



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

**TECHNICKO-EKONOMICKÉ SROVNÁNÍ TAVNÉHO A
OXIDAČNÍHO ZPŮSOBU LASEROVÉHO DĚLENÍ
OCELOVÝCH PLECHŮ PEVNOLÁTKOVÝM LASEREM
(ACO)**

TECHNO-ECONOMICAL COMPARISON OF THE FUSING AND FLAME METHOD OF LASER CUTTING OF
STEEL SHEETS WITH A SOLID-STATE LASER

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Lucia Vojteková

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.

BRNO 2018

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Studentka: **Bc. Lucia Vojteková**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Strojírenská technologie
Vedoucí práce: **doc. RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.**
Akademický rok: 2017/18

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Technicko–ekonomické srovnání tavného a oxidačního způsobu laserového dělení ocelových plechů pevnolátkovým laserem (ACO)

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Provést porovnání řezných parametrů a dosažené kvality řezu pro tavnou a oxidační metodu laserového dělení ocelových plechů různých tloušťek pomocí pevnolátkového laseru. Při hodnocení využít normu ČSN EN ISO 9013 o tepelném dělení materiálů. Následně provést technicko–ekonomické zhodnocení.

Cíle diplomové práce:

Osvojit si technologii laserového dělení materiálu.
Osvojit si metodiku návrhu a provedení experimentu.
Osvojit si základy vyhodnocování drsnosti řezu. kontaktní metodu.
Osvojit si metody mechanických zkoušek svarového spoje.

Seznam doporučené literatury:

BENKO B., FODEREK P., KOSEČEK M., BIELAK R.I: Laserové technológie, 1.vyd., Bratislava, Vydavateľstvo STU, 2000, edice 4859, ISBN 80-227-1425-9.

DULEY W.W.: Laser welding, New York 1999, A.Wiley-Interscience publication, ISBN 0-471-24679-4.

KANNATEY-ASIBU, E.: Principles of Materials Processing, John Wiley&Sons, Inc. Publication, 2009, ISBN 978-0-470-17798-3.

AMBROŽ O., KANDUS B., KUBÍČEK J...: Technologie svařování a zařízení, Ostrava, Zeross, 2001, 395 str. ISBN 80-85771-81-0.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

VOJTEKOVÁ Lucia: TECHNICKO-EKONOMICKÉ SROVNÁNÍ TAVNÉHO A OXIDAČNÍHO ZPŮSOBU LASEROVÉHO DĚLENÍ OCELOVÝCH PLECHŮ PEVNOLÁTKOVÝM LASEREM (ACO)

Predmetom diplomovej práce je porovnanie tavného a oxidačného spôsobu laserového delenia plechu pre firmu ACO Industries k. s., kde bola realizovaná aj experimentálna časť. Po dohore bola práca rozšírená o dáta vzoriek rezaných stlačeným vzduchom pre porovnanie kvality rezu s ostatnými dvoma procesnými plynmi. Návrh optimalizácie rezných parametrov bol vytvorený Taguchiho metódou. Následne bolo prevedené meranie drsnosti vzoriek. Na základe hodnôt parametru R_a a R_{z5} boli vzorky graficky zaradené do tried presnosti, ktoré určuje norma ISO 9013. Výsledky ukázali, že tavný spôsob rezania laserom je vhodnejší, najmä kvalitou reznej hrany, ktorá nepodlieha tvorbe oxidickej vrstvy. Tavný spôsob rezania sa vykonáva reznými rýchlosťami, ktoré sú až dvojnásobne vyššie oproti oxidačnému spôsobu, čo vedie k zníženiu časovej a finančnej náročnosti procesu, a to aj napriek jeho vyššej hodinovej sadzbe. V prípade delenia materiálu stlačeným vzduchom nie je kvalita rezu v porovnaní s tavným a oxidačným spôsobom dostačujúca.

Kľúčové slová

laserové rezanie, tavný spôsob, oxidačný spôsob, rezná rýchlosť, rezné parametre

ABSTRACT

VOJTEKOVÁ Lucia: TECHNO-ECONOMICAL COMPARISON OF THE FUSING AND FLAME METHOD OF LASER CUTTING OF STEEL SHEETS WITH A SOLID-STATE LASER

The aim of diploma thesis is a comparison of flame and fusion laser cutting of thin metal sheets for ACO Industries k. s. company, where the experimental part was also realized. After consultation with company, the thesis was extended by data samples, which were cut by compressed air for comparison with other two gases. The optimization design of cutting parameters was created by Taguchi method. Afterwards the surface roughness of samples was measured. Based on R_a and R_{z5} parameters, the samples were classified to classes based on their accuracy according to ISO 9013 standard. According to results the fusion method of laser cutting is more suitable method, especially for its good quality of cutting edge, which is not affected by the oxidic layer. Fusion method uses cutting speed two times higher than the flame method, which leads to decrease of time and financial consumption of the process despite of its higher hourly rate. In case of laser cutting of material by compressed air the quality of cut is insufficient in comparison with fusion or flame cutting method.

KEYWORDS

laser cutting, fusion method, flame method, cutting speed, cutting parameters

BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA

VOJTEKOVÁ, Lucia. *Technicko-ekonomické srovnání tavného a oxidačního způsobu laserového dělení ocelových plechů pevnolátkovým laserem (ACO)*. Brno, 2018. 58 s., 5 příloh, 0 výkresov, CD. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojířskéj technologie, Odbor technologie zřárání a povrchových úprav. Vedúci práce doc. RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.

ČESTNÉ PREHLÁSENIE

Týmto prehlasujem, že predloženú diplomovú prácu som vypracovala samostatne, s využitím uvedenej literatúry a podkladov, na základe konzultácií a pod vedením vedúceho diplomovej práce.

V Brne dňa 22. 5. 2018

.....

Bc. Lucia Vojteková

POĎAKOVANIE

Týmto ďakujem pánovi doc. RNDr. Liborovi Mrňovi, PhD. za cenné rady a pripomienky týkajúce sa spracovania diplomovej práce a firme ACO Industries k. s., ktorá vytvorila výborné podmienky pre realizáciu experimentálnej časti práce. V neposlednom rade ďakujem rodine za podporu.

Bc. Lucia Vojteková

Obsah

Zadanie
Abstrakt
Bibliografická citácia
Čestné prehlásenie
Poďakovanie
Obsah

ÚVOD	11
1 ROZBOR ZADANIA	12
1.1 Alternatívne možnosti delenia materiálu	
1.1.1 Rezanie kyslíkom	13
1.1.2 Rezanie plazmou	14
1.1.3 Rezanie vodným lúčom	15
1.1.4 Vysekávanie	16
1.1.5 Laserové rezanie	17
1.1.6 Laserové rezanie stlačeným vzduchom	18
2 LASEROVÉ REZANIE	19
2.1 Charakteristika laserového žiarenia	
2.2 Výkonové lasery používané v priemysle	
2.2.1 CO ₂ lasery	23
2.2.2 Nd:YAG lasery	24
2.2.3 Vláknové lasery	25
2.3 Oxidačné rezanie	
2.4 Tavné rezanie	
2.5 Parametre rezného procesu	
2.5.1 Výkon laseru	28
2.5.2 Rezná rýchlosť	28
2.5.3 Kontinuálny (cw) a pulzný (p) režim laserového lúča	29
2.5.4 Druh a tlak procesného plynu	30
2.5.5 Poloha ohniska laserového lúča	30
2.5.6 Priemer trysky a jej vzdialenosť od obrobku	31
2.6 Kvalita a drsnosť rezu	
2.7 Taguchi metóda	
2.7.1 Príklad aplikácie Taguchi metódy	35
3 EXPERIMENTÁLNA ČASŤ	37
3.1 Voľba materiálu	

3.2	Príprava a priebeh experimentu	
3.2.1	Voľba parametrov pre rezanie dusíkom	39
3.2.2	Voľba parametrov pre rezanie kyslíkom	41
3.2.3	Voľba parametrov pre rezanie stlačeným vzduchom	41
3.3	Vyhodnotenie experimentu	
3.4	Meranie drsnosti vzoriek	
3.4.1	Hodnoty drsnosti pri rezaní dusíkom	43
3.4.2	Hodnoty drsnosti pri rezaní kyslíkom	47
3.4.3	Hodnoty drsnosti pri rezaní stlačeným vzduchom	52
3.5	Štruktúra povrchu vybraných vzoriek	
3.5.1	Výber vzoriek rezaných dusíkom	54
3.5.2	Posúdenie vzoriek rezaných kyslíkom	55
3.5.3	Posúdenie vzoriek rezaných stlačeným vzduchom	56
4	TECHNICKO – EKONOMICKÉ ZHODNOTENIE	57
5	ZÁVERY	58

Zoznam použitých zdrojov
Zoznam použitých skratiek
Zoznam obrázkov
Zoznam tabuliek
Zoznam príloh

Úvod [1], [2], [3]

V modernom priemysle sa čoraz častejšie implementujú nekonvenčné spôsoby delenia materiálov, ktoré umožňujú zvýšenie produktivity s dôrazom na kvalitné prevedenie rezu. Laserové rezanie bez pochyb patrí medzi tieto metódy a nachádza efektívne využitie v mnohých priemyselných odvetviach. Vďaka rýchlosti rezania a výbornej kvalite rezných hrán a presnosti sa stáva neodmysliteľnou súčasťou výrobných celkov pri počítačom spracovávaní materiálu. Medzi najdôležitejšie aspekty v priemyselnej výrobe sú náklady spojené s počítačnými investíciami pri kúpe nových zariadení, prevádzkovými nákladmi či samotnou cenou danej technológie. Veľká časť prevádzkových nákladov pri procese laserového delenia materiálov je spojená s druhom použitého procesného plynu. Rezanie materiálov laserom sa najčastejšie uskutočňuje oxidačným spôsobom, kde rezný plyn je kyslík, alebo tavným spôsobom, za použitia dusíku. Každý spôsob má v porovnaní s druhým určité výhody i nevýhody. Na ich použití potom závisí rozsah nastavenia rezných parametrov ako je rezná rýchlosť, výkon laseru, tlak plynu a v neposlednom rade hrá dôležitú úlohu ich cena. Správna optimalizácia parametrov a voľba procesného plynu môže viesť k značnej úspore financií v kombinácii s výbornou kvalitou rezných hrán. Táto práca predkladá optimalizáciu rezných parametrov na 2D laserovom centre TruLaser 3030, ktorý vlastní firma ACO Industries k. s. v Příbyslavi s následným technicko – ekonomickým zhodnotením.



Obr. 1: Príklady laserového rezania. [4], [5], [6]

1 ROZBOR ZADANIA [7], [8], [9]

V dnešnej dobe sú kladené vysoké nároky na znižovanie nákladov na výrobu súčiastok no taktiež je snaha o zníženie výrobných časov, a tým zvýšenie produktivity pri zachovaní potrebnej kvality prevedenia rezu. V prípade laserových technológií je nevyhnutné vhodne zvoliť metódu delenia a následne optimalizovať procesné parametre (rezná rýchlosť, rezný výkon, poloha ohniska a tlak plynu) s cieľom získania vhodnej kombinácie, ktorá vyhovuje týmto požiadavkám. Nevhodne zvolené parametre môžu viesť k vyššej časovej náročnosti procesu, zlej kvalite rezu, prípadne sa nezhodujú s ekonomickými požiadavkami na danú technológiu.

V tejto práci budú optimalizované procesné parametre stroja TruLaser 3030, ktorý vlastní firma ACO Industries k. s. so sídlom v Příbyslavi. Firma ACO Industries k. s. sa zaoberá výrobou odvodňovacích systémov, viď obr. 2. Vo svojej výrobe spracovávajú najmä čiernu oceľ, koróziivzdornú oceľ a polymérbetón. Medzi nevyhnutné a prvé operácie ich výroby patrí delenie plechu.

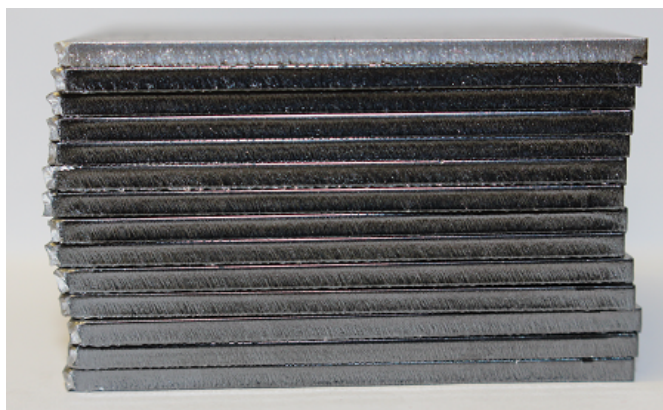
Aj v tomto prípade je nutné zvážiť spôsob delenia materiálu. Tu je možné zvažovať dva spôsoby rezania, a to tavný a oxidačný spôsob. Tieto metódy sa líšia v použitom reznom plyne, ktorým je kyslík alebo dusík. Tieto metódy odlišne vplývajú na kvalitu rezu, drsnosť reznej hrany, prípadne iniciujú vady, ktoré sú v procese výroby neprípustné. Ich použitie tiež závisí na druhu rezaného materiálu a jeho hrúbke. Každá z metód má určité výhody a nevýhody a ich použitie závisí od konkrétnej aplikácie.

Pre posúdenie kvality rezu z technického hľadiska je nutné okrem vizuálneho zhodnotenia rezu tiež merať drsnosť jednotlivých vzoriek s následným štatistickým spracovaním. K posúdeniu drsnosti rezu slúži norma ČSN EN ISO 9013 a k posúdeniu väd rezu sa používa norma ČSN EN 12584. Posúdenie kvality rezu sa skúma na vzorových súčiastkach (štandardne štvorce v rozmeroch 50 x 50mm), viď obr. 3, ktoré môžu mať naviac vyrezanú dieru v strede. Vzorové diely sa vyrábajú pri zadaní unikátnych procesných parametrov vytvorených maticovým systémom, ktorý zaručuje všetky kombinácie týchto parametrov.

Súčasťou zhodnotenia je aj ekonomické zhodnotenie oboch metód. Tu hrá dôležitú úlohu spotreba rezného plynu, ktorá je u tavného spôsobu násobne vyššia, no oproti oxidačnému spôsobu dovoľuje rýchlejšiu realizáciu úkonu, čo môže zasa znížiť časovú náročnosť procesu. Do ekonomického zhodnotenia sa tiež zaraďujú ďalšie parametre, napr. počet vyrobených kusov ročne,



Obr. 2: Produkty firmy ACO Industries k.s. [8]



Obr. 3: Vzorové súčiastky

náklady spojené s prevádzkou, náklady na obsluhu, atď. V rámci dohovoru bola práca rozšírená o optimalizáciu parametrov rezania použitím stlačeného vzduchu ako procesného plynu.

1.1 Alternatívne možnosti delenia materiálu [1], [3], [7]

Jednou z prvých operácií pri výrobe súčastí je rezanie (delenie) materiálu. Delenie materiálu sa historicky vyvíjalo a vylepšovalo od klasických konvenčných technológií založených na plastickej deformácii (skrut, strih) až k novým technológiám založených na odparovaní materiálu z miesta rezu (plazma, laser), prípadne fyzikálne- chemickým metódam rezania materiálu. Ne-konvenčné metódy delenia materiálu boli vyvinuté kvôli vyšším nárokom na spracovanie, ktoré nemožno plniť konvenčnými metódami. Medzi tieto požiadavky patrí:

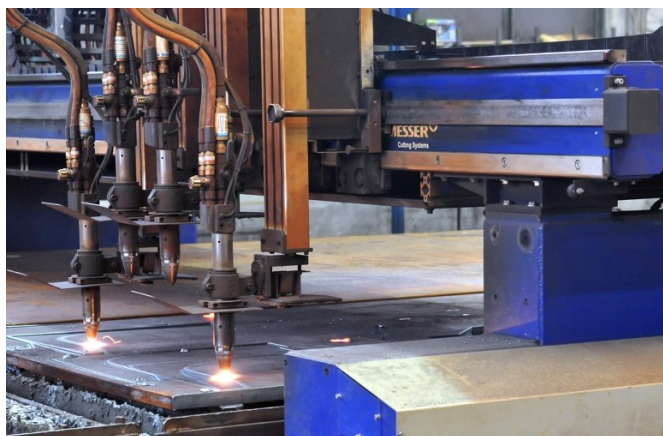
- obrábanie novo-vyvinutých kovových a nekovových materiálov so špecifickými vlastnosťami (vysoká pevnosť, tvrdosť, húževnatosť)
- výroba komplexných geometrických tvarov, ktorých výroba konvenčným spôsobom by bola náročná
- nutnosť vyhnúť sa povrchovým vadám vedúcim k tvorbe napätia a následného poškodenia
- minimalizácia nákladov na výrobu a zvýšenie produktivity

1.1.1 Rezanie kyslíkom [10], [12], [13], [14]

Podstatou technológie delenia kovových materiálov kyslíkovým plameňom je proces spaľovania železa ohriateho na zápalnú teplotu v prúde kyslíka. Rezaný materiál sa spaľuje rezacím kyslíkom za vzniku oxidov, ktoré sú v podobe tekutej trosky vyfukované dynamickým účinkom kyslíka z miesta rezania. Proces spaľovania, v ktorom vznikajú rôzne druhy oxidov železa je výrazne exotermická reakcia, t. j. s veľkým vývinom tepla v mieste rezania. Na začiatku procesu je potrebný ohrev materiálu v začiatku rezu na zápalnú teplotu, v druhej fáze je privedený pod vysokým tlakom kyslík, ktorý spaľuje častice železa a vyfukuje roztavený kov z reznej škáry.

V procese sa používa kombinácia čistého kyslíka a palivového horľavého plynu, napríklad acetylénu alebo propánu (menej často sa používa aj zemný plyn). Kyslík umožňuje dosiahnuť vyššiu teplotu plameňa v porovnaní s obyčajným vzduchom. Zatiaľ čo vzduchovo-propánový plameň horí pri teplote okolo 2 000 °C, v kombinácii s kyslíkom je to až 2 500 °C. Kyslíkovo-acetylénový plameň dosahuje dokonca až 3 500 °C. Rezanie kyslíkom sa používa pre nelegované a nízko-legované ocele do hrúbky 300 mm a viac. Proces ovplyvňujú nasledujúce faktory:

- rezaný materiál (typ, kvalita, stav povrchu)
- rezacie zariadenie (tryska, horák)



Obr. 4: Rezanie kyslíkom [13]

- kyslík (tlak, prietok, čistota)
- horľavý plyn (typ, tlak, prietok).

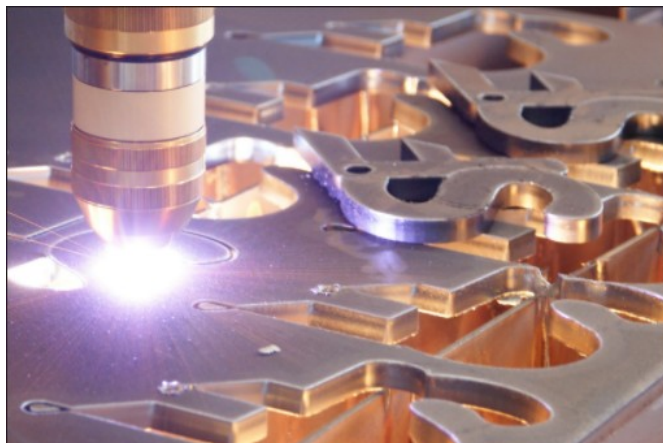
Rezanie kyslíkom je vhodné najmä pre stredné a väčšie hrúbky materiálov v rozsahu 10–100 mm. Pri tejto technológii je možné použitie viacerých horákov naraz, viď obr. 4, čo zvyšuje produktivitu. Obstarávacie náklady na zariadenia sú nízke, rovnako tak sú dostupné aj rezné plyny. Zariadenia sa vyrábajú ako v manuálnom, tak v strojovom prevedení.

Obmedzenia technológie sú spojené najmä s obmedzeným sortimentom materiálu, ktorý je možné danou metódou deliť (nemožno rezať hliník ani jeho zliatiny). Vzniká veľká tepelne ovplyvnená oblasť, čo je spojené so zlou kvalitou (drsnosťou) povrchu, najmä pri hrúbkach pod 5 mm a zlou rozmerovou stabilitou.

1.1.2 Rezanie plazmou [1], [11], [12], [14], [15], [16], [17], [20]

Plazma je z fyzikálneho hľadiska zionizovaný plyn zložený z iónov, elektrónov a tiež z neutrálnych častíc. Vzhľadom na to, že sa v plazmovom oblúku dosahujú veľmi vysoké teploty, používa sa plazma v priemysle na tepelné delenie kovových materiálov. Možno ňou rezať ručne, alebo sa používa v CNC rezacích centrách.

Je to proces, pri ktorom sa neutrálny plyn, napr. stlačený vzduch vháňa vysokou rýchlosťou cez dýzu do elektrického oblúka, ktorý sa zvyčajne vytvára vysokonapäťovou iskrou. Tým sa tento plyn zionizuje, uzatvorí sa elektrický obvod s povrchom kovového materiálu, vytvorí sa plazmový oblúk vysokej teploty, ktorý roztaví kov určený na rezanie (obr.5). Plyn prúdiaci vysokou rýchlosťou zároveň odstráni roztavený kov z reznej medzery. Plazmový lúč je zvyčajne chladený vodou čo umožňuje dosiahnutie jeho hustoty energie až $2 \cdot 10^6 \text{ W.cm}^{-2}$. Bežne sa používa do hrúbky 150 mm. Možno ňou rezať mäkké, koróziivzdorné a uhlíkové ocele ale aj hliník, meď, mosadz a iné kovy. Charakteristika rezov rôznymi druhmi plazmy je uvedená v tab.1.1.



Obr. 5: Príklad rezania plazmou [19]

Tab. 1.1 Vlastnosti rezu v závislosti na druhu plazmy [17]

Typ plazmy	Rezná rýchlosť	Hrúbka rezu [mm]	Kvalita rezu
vzduch	vysoká	40	priemerná
Ar + H ₂	nízka	20 - 65	vysoká
N ₂ +H ₂ O	vysoká	100	vysoká
O ₂	vysoká	140	vysoká

Delenie materiálu technológiou rezania plazmou je vhodné najmä pri rezaní stredných hrúbok do 150 mm (pre väčšie hrúbky je delenie plazmou neekonomické a rezné plochy majú horšiu kvalitu). Je možné rezať vysokopevné konštrukčné ocele s nižším tepelným ovplyvnením, dobrá drsnosť povrchu pre koróziu vzdorné ocele. V porovnaní s technológiou rezania kyslíkom

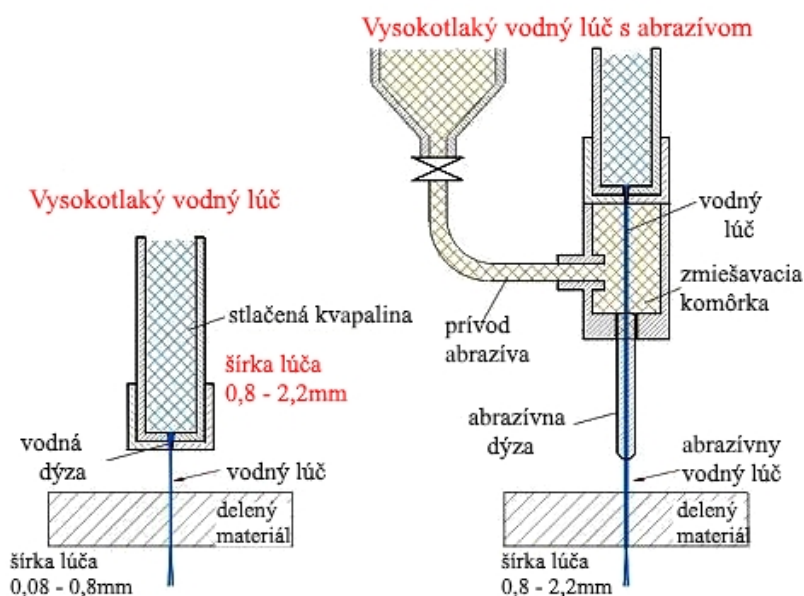
je u plazmy dosahovaná lepšia kvalita rezu pri delení hrubých materiálov. Pre delenie tenkých plechov je lacnejšia ako laser, dosahuje dobrú kvalitu rezu, avšak vyššie tepelné ovplyvnenie. Problém u plazmy nastáva pri smerovaní lúča a zaistení jeho dočasnej stálosti, čo vedie k tzv. podrezávaniu. Rezanie materiálu plazmou neumožňuje vytvárať malé zaoblenia reznej hrany, ani úzke drážky. Rez má pomerne veľkú šírku. So zvyšovaním intenzity prúdu rastie hluk a takisto je nutné vhodne riešiť odsávanie priestorov, nakoľko sa produkujú škodlivé výpary. V porovnaní s kyslíkom je horšia dostupnosť plynov.

Rezanie plazmou je pomerne bežná, cenovo dostupná technológia, ktorá používa jednoduché, kompatibilné technologické zariadenia s možnosťou jednoduchého prenášania. Z hľadiska produktivity je u plazmy dosahovaná najvyššia rezná rýchlosť, čím zásadne znižuje náklady na delenie kovov vo výrobné fáze a je často nezastupiteľná.

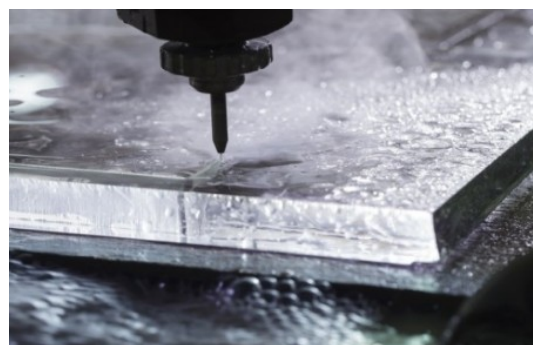
1.1.3 Rezanie vodným lúčom [11], [12], [16], [21], [22], [23], [24]

Túto technológiu môžeme zaradiť medzi mechanické spôsoby delenia materiálu. Princíp delenia (obr. 8) je založený na intenzívnom hydroerozívnom účinku úzkeho prúdu vody s veľkou rýchlosťou prúdenia vodného média, ktoré je stlačené na výstupe z rezacej dýzy na tlak niekoľko tisíc barov. Pre zlepšenie rezacieho účinku vodného média sa pridáva v práškovej forme abrazívum, napr. korund. Metóda je vhodná pre delenie najrôznejších materiálov od ocelí (konštrukčných, legovaných, s vysokou hodnotou tvrdosti, ...), zliatin hliníku, titánu, niklu, medi, kompozitov, plastov, ale aj pre delenie penových a tesniacich materiálov, podlahových krytín, a pod.

Hlavnou výhodou tejto metódy je najmä fakt, že nevzniká tepelne ovplyvnená oblasť, takže nie je ovplyvnená vnútorná štruktúra materiálu a možno rezať aj materiály citlivé na teplo (drevo, termoplasty, ...). Tiež je možná tvorba zložitých tvarov jedným nástrojom s vysokou presnosťou ($\pm 0,1$ mm) a medzi jednotlivými vyrezanými časťami možno nechať medzeru len niekoľko mm, čím sa zásadne ušetrí materiál. Proces prebieha bez škodlivých plynov, prítomnosti olejov, či produkcie spalín. Vplyvom abrazíva je rezná hrana deformačne spevnená. Pri delení väčších hrúbok materiálu vodný lúč



Obr. 6: Princíp rezania vodným lúčom [24]



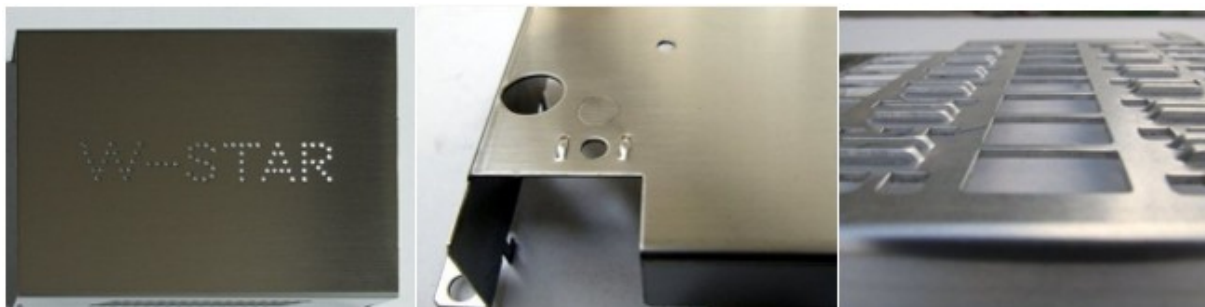
Obr. 7: Rezanie vodným lúčom [23]

stráca na účinnosti a delenie takýchto materiálov je ekonomicky nevýhodné. V porovnaní s plazmou sú počiatkové investície a prevádzkové náklady vysoké a rýchlosť rezania nízka. Delenie prebieha vo vlhkom prostredí, viď. obr.8, čo môže spôsobiť oxidáciu, prípadne koróziu na rezných plochách a je nutná následná povrchová úprava. Obrábanie vodným lúčom poskytuje veľa výhod, a preto je táto technológia predmetom skúmania a vývoja nových aplikácií a spôsobov využitia.

1.1.4 Vysekávanie [11], [12], [25], [26], [27]

Technológiu delenia plechov, ktorú určite nemožno opomenúť je technológia vysekávania. Vysekávanie patrí medzi metódy plošného tvárnenia, kde polotovarom môže byť pás alebo zvitok plechu. Charakteristickou črtou procesu je, že tu vzniká stav dvojsoého napätia, podobne ako pri strihaní. Na rozdiel od iných tvárniacich technológií stav plastickej deformácie a porušenie celistvosti materiálu sú nežiadúce. Proces je podobný technológii strihania. Delenie prebieha za podmienok elastických a plastických deformácií, kedy je materiál namáhaný strižným šmykovým napätím τ_s . Keď dôjde k prekročeniu medze pevnosti v šmyku, vznikajú mikroskopické a makroskopické trhliny, ktoré sa šíria až do samotného oddelenia materiálu.

Vysekávanie sa uskutočňuje na vysekávacích CNC zariadeniach, na ktorých je navyše možné dierovanie, razenie špeciálnych značiek, prestrihávanie, rezanie závitov, apod. To zásadne skracuje výrobné časy. Medzi spracovávané materiály patria hlavne nízkoalégované konštrukčné ocele prípadne nerezové oceli. Je však možné spracovávať aj pozinkované plechy, hliník, eloxovaný hliník, meď a mosadz.



Obr. 8: Príklady vysekávaných dielcov [27]

Táto technológia sa využíva hlavne pre tenšie plechy hrúbky 0,5 mm do 6 mm. V prípade plechov z nerezovej ocele je hrúbka deleného materiálu nižšia (do 0,4 mm). Presnosť vysekávania sa pohybuje v rozsahu $\pm 0,1$ mm.

Vysekávanie (dierovanie) je možné použiť v kombinácii s laserovým rezaním, kedy CNC stroj obsahuje hlavu pre vysekávanie a reznú laserovú hlavu. Na kvalitu a presnosť procesu majú okrem materiálu vplyv aj procesné parametre, medzi ktoré možno zaradiť:

- veľkosť strižnej vôle,
- vysekávací sila,
- strižná práca,
- strižný odpor,
- prevedenie a presnosť vedenia nástroja.

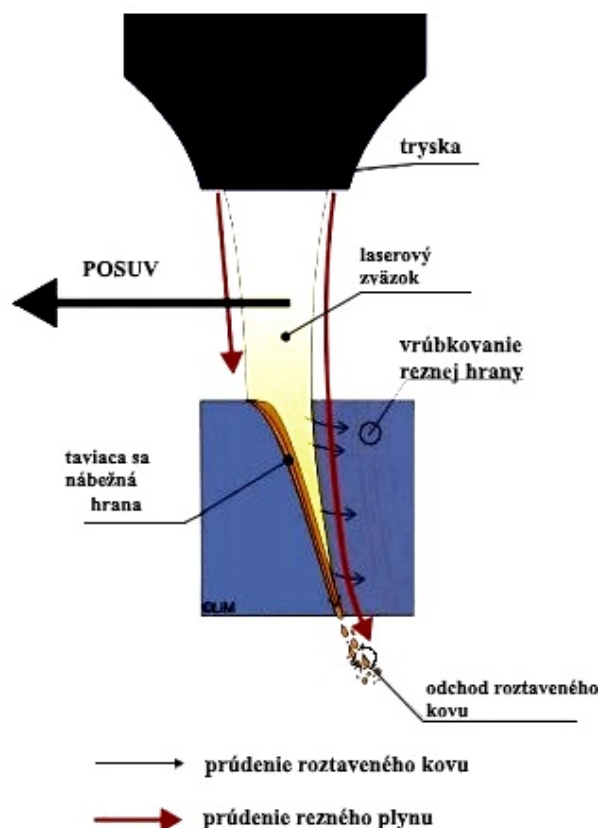
Výhodou tohto procesu je, že nedochádza k tepelnému namáhaniu ako je tomu napríklad pri rezaní laserom, a teda ju možno použiť v prípadoch kedy je laserové rezanie neprípustné. U dielcov, kde je požadované veľké množstvo otvorov je vysekávanie lacnejšou variantou v porovnaní s laserom a taktiež dosahuje lepšiu kvalitu strižnej hrany. Ďalšou výhodou tohto procesu je vysoká produktivita a presnosť. Pri dierovaní môžu stroje dosahovať rýchlosť až $1200 \text{ zdvihov.min}^{-1}$. Táto technológia sa stáva efektívnou hlavne pri veľkých sériách vyrábaných dielcov, nakoľko výroba zložitejších súčastí si vyžaduje samostatné nástroje pre konkrétne tvary, ktorých výroba je finančne náročná.



Obr. 9: Vysekávací stroj [27]

1.1.5 Laserové rezanie [2], [3], [5], [7], [28], [29], [31], [40]

Laser je zdrojom špeciálneho druhu svetla, ktoré sa v prírode nevyskytuje. Základom každého laseru je aktívne prostredie. Ide o médium, ktoré zosilňuje ním prechádzajúce žiarenie vďaka stimulovanej emisii fotónov. Žiarenie je monochromatické, čo znamená, že všetky fotóny majú rovnakú vlnovú dĺžku a tá definuje jeho farbu. Fotóny sú navyše vo fáze a postupujú rovnakým smerom (koherencia žiarenia). Vysoká koherencia v kombinácii s nízkou rozbiehavosťou laserového zväzku umožňujú jeho fokusáciu na veľmi malý priemer (menej než 0,5 mm), a tým dosiahnutie vysokej hustoty výkonu laserového žiarenia ($10^7 - 10^9 \text{ W.cm}^{-2}$). Laserové rezanie patrí medzi tepelné metódy delenia materiálu. Lúč je sústredený na materiál cez otvor trysky, a tým sa materiál zohrieva a taví. Pomocou rezacieho plynu, ktorý spravidla koaxiálne prúdi cez trysku, dochádza k vyfukovaniu roztaveného materiálu, viď obr. 10. Delenie prebieha tromi spôsobmi:



Obr. 10: Princíp laserového rezania [40]

- sublimačným rezaním lúč odparuje materiál (sublimuje). Nereaktívny plyn (napr. dusík) vytláča odparený materiál z reznej štrbiny. Často sa tento spôsob používa pri delení fólií a nekovových materiálov.
- Pri tavnom rezaní je materiál roztavený laserom. Ako rezací plyn sa používa inertný plyn (dusík) na vytlačanie taveniny z reznej štrbiny. Typické použitie je pre legované ocele.
- Oxidačné rezanie je určené pre materiály, ktoré sú charakteristické vysokou tepelnou vodivosťou. Medzi tieto materiály patrí najmä čierna oceľ a meď. Ako procesný plyn slúži kyslík, ktorý podporuje horenie a tým pádom lokálne zvýšenie teploty v oblasti rezu.

Tavný a oxidačný spôsob laserového delenia materiálov sú najčastejšie používané metódy v priemysle a nakoľko sú predmetom tejto práce budú podrobnejšie rozobraté v nasledujúcej kapitole.

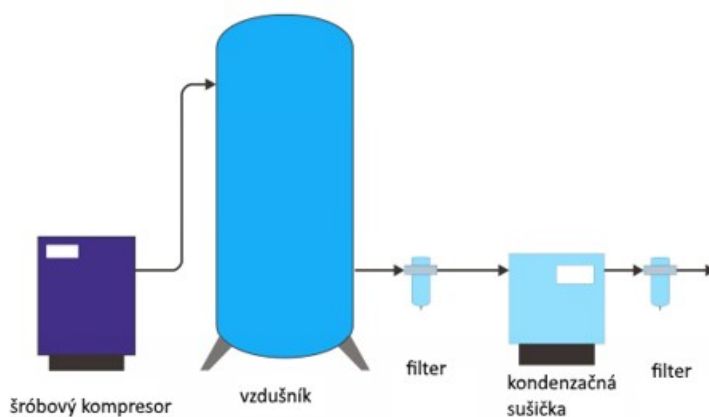
Laserové rezanie je vhodné najmä pre materiály do hrúbky 20 mm a používa sa tam, kde je požadovaná vysoká presnosť a kvalita reznej hrany. Obzvlášť sa táto technológia uplatňuje pri delení hliníku a jeho zliatin, delení mäkkej ocele a zliatin ocele. Delenie prebieha vysokou rýchlosťou, čo robí túto technológiu produktívnou a vhodnou pre veľkosériovú výrobu. Taktiež je možná jednoduchá automatizácia procesu. Vnesené teplo dosahuje minimálne hodnoty a rez je kolmý. Presnosť delenia sa pohybuje v rozmedzí $\pm 0,1$ mm v závislosti na materiáli a jeho hrúbke. Na druhej strane táto technológia vyžaduje vysoké vstupné a prevádzkové náklady (vysoká spotreba plynu). Rozsah delených hrúbok je pomerne malý a efektívnosť zariadení je na úrovni približne 10% (u CO₂ laseru).



Obr. 11: Rezanie laserom [28]

1.1.6 Laserové rezanie stlačeným vzduchom [32], [33], [34], [35]

Ako už bolo spomenuté v predchádzajúcej kapitole, najčastejšie používané plyny pri rezaní laserom sú kyslík a dusík. Ďalším spôsobom je rezanie stlačeným vzduchom. Ako napovedá názov, v tomto prípade sa ako procesný plyn používa stlačený vzduch. Cieľom rezania stlačeným vzduchom je využiť dusík, ktorý je v ňom zastúpený a jeho dobré rezacie vlastnosti, za použitia relatívne lacného „horšieho“ plynu. Používa



Obr. 12: Postup výroby stlačeného vzduchu [35]

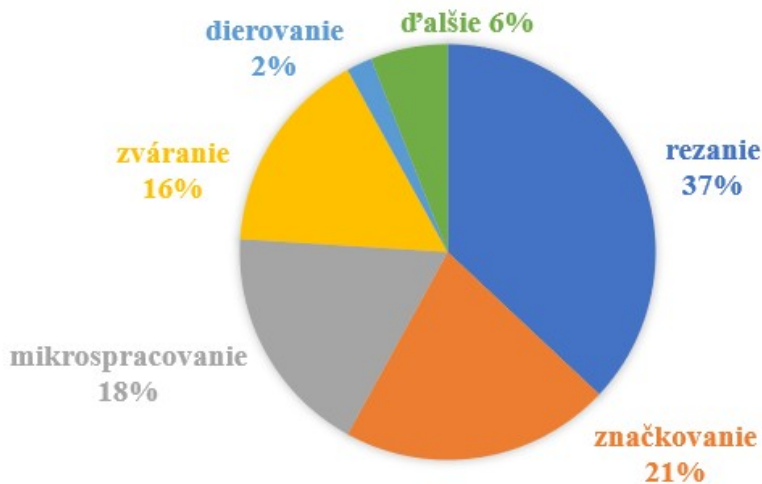
sa teda najmä pre zníženie nákladov, nakoľko je jeho cena nižšia ako u dusíku, či kyslíku. Bežne sa používa na rezanie ocelí, koróziivzdorných ocelí a hliníku. Ďalšou výhodou stlačeného vzduchu je vyššia rezná rýchlosť a vysoký výkon, najmä pri rezaní mäkkej ocele.

Na obr. 12 je znázornený postup výroby stlačeného vzduchu. Cez šróbový kompresor je nasávaný vzduch z okolitej atmosféry cez vzduchový filter. Ďalej putuje potrubím do vzdušníku, kde sa hromadí. Následne prejde cez filter, ktorý neprepustí častice väčšie ako 3 μm . V kondenzačnej sušičke prebieha kondenzácia vlhkosti. Ešte pred vypustením prejde vzduch ďalším filtrom, ktorý neprepustí častice väčšie ako 0,01 μm .

Stlačený vzduch sa všeobecne používa pre rezanie tenkých plechov (približne do hrúbky 2 mm). Kvalita reznej hrany nie je tak dobrá ako je tomu pri použití dusíku, a preto je jeho použitie vhodné len tam, kde nie sú kladené vysoké nároky na výslednú kvalitu rezu. V porovnaní s dusíkom nie je čistota rezu dostatočná, a teda jeho použitie nie je vhodné napríklad v potravinárskom, či leteckom priemysle, kde je čistota rezu nutnosťou.

2 LASEROVÉ REZANIE [3], [7], [16], [28], [29], [31], [37]

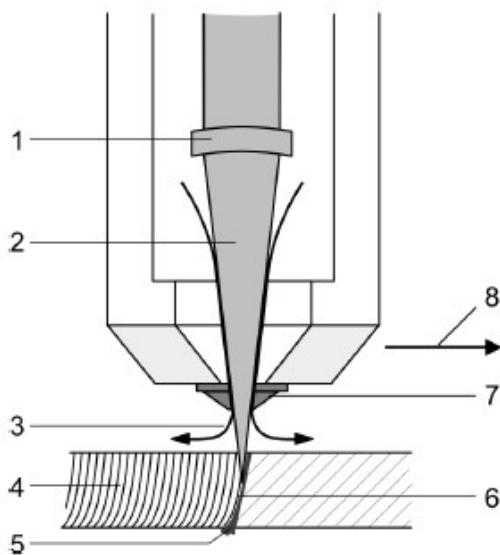
Pre účely laserového rezania bol prvý laser použitý v 70-tych rokoch 20. storočia. Bol to plynový CO₂ laser s výkonom 200 – 500 W. Následný veľký prielom nebol uskutočnený až do vývinu rezacích systémov, nakoľko laser vyžaduje systém, ktorý vedie lúč veľmi presne do bodu. Názov laser je akronym vytvorený zo začiatkových písmen „Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation“, čo v preklade znamená „zosilňovanie svetla pomocou stimulovanej emisie žiarenia“. V rokoch 1965 – 1970 boli rozpracované princípy technologických aplikácií laserového žiarenia, ktoré ukázalo, že na väčšinu technologických aplikácií stačia len malé výkony v rozsahu 10 – 200 W. Rozvoj všetkých typov laserov prebiehal veľmi rýchlo, pokrok nastával predovšetkým zvyšovaním výkonu a energie impulzných laserov a posunom ku kratším vlnovým dĺžkam.



Obr. 13: Zastúpenie laserových technológií v priemysle [7]

Tepelné spôsoby delenia materiálu používajú pre rezanie koncentrovaný zdroj tepla na povrch obrobku. Teplo je zvyčajne vnášané lokálne do súčasti kondukciou, konvekciou, alebo radiačne absorpčným mechanizmom, pokým nedosiahne tekutého, alebo plynného stavu, ktorý umožňuje jednoduché odstránenie materiálu z rezu s pomocou tlakového toku procesného plynu. V prípade laseru je tento prenos tepla zabezpečovaný radiačne.

Laserové rezanie podobne ako u iných spôsobov tepelného delenia materiálu využíva kombinovaný efekt tavenia a sublimácie kovu usmerneným prúdom rezného plynu. Vysoká energia laserového lúča



- 1 Fokusačná optika
- 2 Laserový lúč
- 3 Prúd rezného plynu
- 4 Rezaná plocha
- 5 Tavenina

- 6 Obrobok
- 7 Tryska
- 8 Smer rezania

Obr. 14: Časti laserového procesu [39]

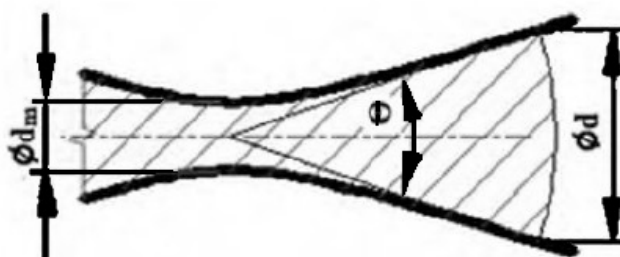
je zaostrená na bod obrobku, pričom dochádza k lokálnemu nataveniu do celej hĺbky materiálu. Zjednodušene ide o vytvorenie počiatočného priepalu v materiáli a jeho následnom postupnom odtavení, viď obr. 14. Keď laserový lúč dopadne na plochu obrobku, materiál sa zahrieva až pokým sa nezačne taviť a vyparovať z miesta rezu. Akonáhle úplne prenikne do celej hĺbky obrobku začína proces rezania. Laserový lúč sa pohybuje pozdĺž obrysu súčiastky a nepretržite taví a vyfukuje materiál z miesta rezu. To sa deje za pomoci prúdu rezného plynu vnášaného do reznej štrbiny. Výsledkom je úzka medzera medzi obrobkom a odpadovým materiálom. Rezný plyn je emitovaný z trysky spolu s laserovým lúčom. Najčastejšie sa ako rezný plyn používa dusík, kyslík, prípadne stlačený vzduch.

Spracovanie pomocou laseru je nazývané aj ako fyzikálny spôsob spracovania vysoko čistým zdrojom a vysokou hustotou energie. Umožňuje sústredenie energie na veľmi malú plochu, kde je veľmi veľký prívod energie, a to zapríčiňuje potlačenie vplyvu odvodu tepla do materiálu. To spôsobuje urýchlenie technologických procesov a ovplyvnenie menšieho objemu materiálu. Z laserových technológií sa najviac uplatňuje rezanie (obr.13).

2.1 Charakteristika laserového žiarenia [7], [31], [40]

Ako bolo spomenuté v predchádzajúcej kapitole laserové žiarenie je elektromagnetické žiarenie, no jeho vlastnosti sa odlišujú od klasických zdrojov. Najdôležitejšie z nich sú monochromatickosť, koherentnosť, smerovosť a módová štruktúra.

Monochromatickosť vyplýva z podstaty stimulovanej emisie žiarenia. Smerovosť je podmienená tým, že žiarenie na výstupe z lasera na povrchu polopriepustného zrkadla je koherentné na ploške, ktorá je oveľa väčšia ako vlnová dĺžka žiarenia. Smerovosť je charakterizovaná priestorovým uhlom (v praxi sa udáva rovinný uhol divergencie lúča, obr. 15). Tento uhol je možné určiť pomocou vzťahu (2.1).



Obr. 15: Uhol divergencie lúča [11]

$$\theta = \frac{4\lambda}{(\pi \cdot d_m)} [rad] \quad (2.1)$$

kde,

θ ... uhol divergencie lúča [rad]

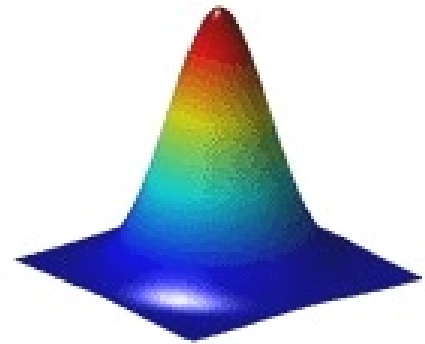
λ ... vlnová dĺžka žiarenia [mm]

π ... Ludolfovo číslo [-]

d_m ... priemer lúča na výstupe z rezonátora [mm]

d ... priemer nezaostreného lúča [mm]

Tvar laserového lúča určuje tzv. mód. Základný tvar je daný konštrukciou optického rezonátora a závisí na nastavení zrkadiel. Väčšina technických aplikácií požaduje dokonalú symetriu módu. Nesprávna a správna symetria lúča je znázornená na obr. 17. Ten má veľký vplyv na veľkosť stopy sfokusovaného lúča. Mód najnižšieho rádu je mód TEM_{00} (Transversal Electromagnetic Mode), znázornený na obr. 16. Má Gaussovské rozloženie intenzity s maximom v osi. Rozdelenie energie naprieč lúčom je dané vzťahom 2.2. Práve s týmto módom pracuje väčšina technicky využívaných laserov.



Obr. 16: Mód TEM_{00} [31]

$$I = I_0 \cdot e^{\left(-\frac{2r^2}{r_0^2}\right)} \quad (2.2)$$

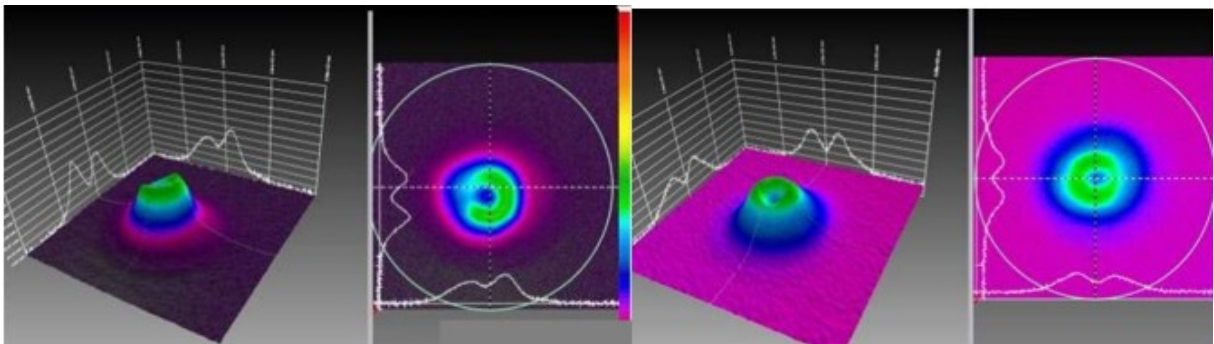
kde,

I ...intenzita žiarenia v lúči v závislosti od radiálneho rozmeru [$W.mm^{-2}$]

r ...radiálna vzdialenosť od osi lúča [mm]

r_0 ...definovaný polomer lúča [mm]

I_0 ...intenzita žiarenia v strede lúča [$W.mm^{-2}$]



Obr. 17: Nesprávna a správna symetria lúča [31]

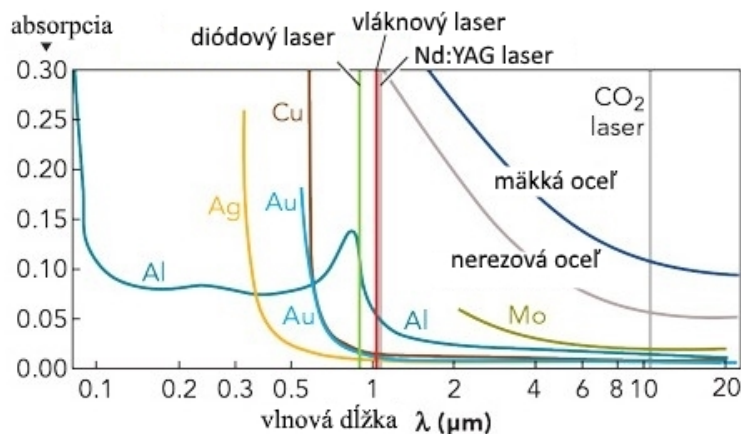
Laserový lúč je funguje teda ako zdroj energie, ktorý sa vyznačuje špecifickými vlastnosťami:

- v dopadovej ploche dosahuje vysokú hustotu výkonov ($10^4 - 10^9 W.cm^{-2}$),
- má schopnosť sústrediť energiu na malú plochu,
- premena energie žiarenia na teplo sa uskutočňuje až v materiáli,
- vnesené teplo spôsobuje materiálu minimálne deformácie,
- v priehľadnom prostredí sa laserový lúč šíri bez strát
- zariadenia emitujúce laserové žiarenie umožňujú presné dávkovanie energie a reprodukovateľnosť procesov

Dôležitým predpokladom pre efektívne využitie laserového lúča je tiež absorpcia žiarenia materiálom a následná premena na teplo. Optické vlastnosti sú materiálovou charakteristikou, no sú výrazne závislé od parametrov laserového lúča. Absorpcia sa vyjadruje tzv. koeficientom odrazu, ktorý pre oblasť nízkych intenzít (do 10^6 W.cm^{-2}) v značnej miere závisí na elektrických vlastnostiach kovu. V reálnych technologických apli-

káciách majú na hodnotu absorpcie vplyv materiálové vlastnosti, vlnová dĺžka žiarenia a predovšetkým stav povrchu (príloha 1). Všeobecne platí, že so zvyšovaním vlnovej dĺžky žiarenia koeficient absorpcie klesá. Absorpcia sa tiež zvyšuje so stúpajúcou teplotou materiálu.

Pri rezaní dreva, plastov, kompozitných materiálov, skla je nutné použiť CO_2 laser, nakoľko vlnová dĺžka vláknových laserov nie je u týchto materiálov vôbec pohlcovaná. Naopak pri rezaní kovových materiálov je výhodné použiť lasery s menšou vlnovou dĺžkou žiarenia, ktorú kovové materiály pohlcujú. Závislosť absorpcie žiarenia rôznych materiálov na vlnovej dĺžke žiarenia je znázornená na obr. 18.



Obr. 18: Absorpcia žiarenia niektorých materiálov [32]

2.2 Výkonové lasery používané v priemysle [3], [7], [31], [32]

Všeobecne možno lasery rozdeľovať podľa rôznych kritérií, a to podľa vlnovej dĺžky optického žiarenia, pracovného režimu, podľa zúčastnených energetických hladín na kvantovom prechode, podľa typu pracovného režimu. Základné rozdelenie je nasledovné:

- podľa typu aktívneho prostredia:
 - plynové (CO_2)
 - pevnolátkové (Nd:YAG, Yb:YAG,)
- podľa pracovného režimu:
 - kontinuálne (cw) nepretržité generovanie žiarenia
 - pulzné (pw) – pulzy s vysokou opakovacou frekvenciou
 - impulzné (Qs) – vysoko energetické pulzy s nízkou opakovacou frekvenciou
- podľa vlnových dĺžok optického žiarenia:
 - infračervené (780 nm – 1 mm)
 - ultrafialové (10 nm – 360 nm)
 - röntgenové (10 nm – 1 pm)

- viditeľné pásmo (360 nm – 780 nm)

V priemysle sa lasery rozlišujú hlavne na základe typu aktívneho prostredia. V závislosti od typu laseru a požadovanej vlnovej dĺžky je aktívne prostredie plyn, pevná látka alebo kvapalina. Najviac sú používané CO₂ lasery a pevnolátkové lasery ako aj ich inovácie, ktoré budú popísané v ďalšom texte.

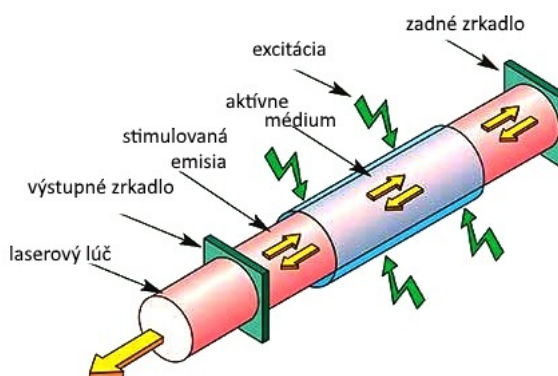
2.2.1 CO₂ lasery [7], [12], [31], [37], [38], [39], [41], [42]

Tieto lasery patria medzi najstaršie druhy plynových laserov, no sú v súčasnosti najviac perspektívne v priemyselnej praxi a najviac používané pre zváranie a rezanie materiálu. Optický rezonátor CO₂ laseru emituje svetlo s vlnovou dĺžkou 10,6 μm . Aktívne médium je tu tvorené oxidom uhličitým CO₂, héliom He (zabezpečuje rozptyl tepla) a dusíkom N₂ (elektrický výboj v dusíku vytvára energiu nevyhnutnú na nabudenie). Plyny je nutné neustále dopĺňať. Hlavné prednosti CO₂ laserov sú pomerne vysoká energetická účinnosť, ktorá je asi 5 – 10% a veľké výkony 10 – 20 000 W. Vďaka vysokej stálosti výkonu je proces rezania spoľahlivý. Je možné s nimi pracovať ako v kontinuálnom tak v pulznom režime. Nevýhodou týchto laserov je nutnosť použitia špeciálnej refrakčnej optiky (šošovky z ZnSe, Ge, GaAs) a reflexnej optiky. CO₂ lasery môžu mať rôzne usporiadanie rezonátorov, systémy prietoku pracovného plynu a elektrického výboja. Aktívne prostredie a laser samotný musí byť chladený. Najčastejšie používané typy výbojok sú:

- lasery s uzavretou výbojkou - bez prietoku plynu ($30 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1}$)
- lasery s pomalým prietokom plynu
- lasery s rýchlym pozdĺžnym alebo priečnym prietokom plynu ($1 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-1}$)

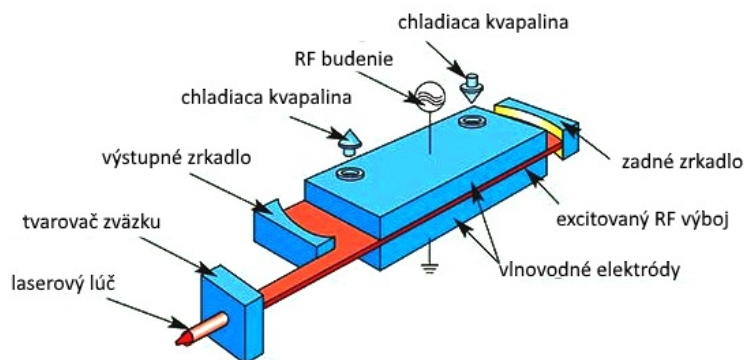
Ako najlepšie riešenie sa ukázala konštrukcia rezonátora v podobe plochej výbojovej komory s rozmermi 800 mm x 250 mm x 1,5 mm. Takýto laserový zdroj dosahuje výkon do 2 kW s módom TEM₀₀.

CO₂ lasery s pomalým prúdením sú najstarším typom laseru tohto druhu. Energia sa aktívnemu prostrediu privádza jednosmerným, alebo striedavým elektrickým výbojom. Tento výboj má smer zhodný s osou rezonátoru aj zväzkom vystupujúceho žiarenia. Dosahuje sa tu stabilný výstupný výkon a dobrá módová charakteristika žiarenia, čoho výsledkom sú kvalitné rezy. Pracovný režim môže byť pulzný aj kontinuálny. Používané výkony sú v rozsahu do 1kW. Na obr. 19 je znázornená konštrukcia štandardného usporiadania CO₂ laseru.



Obr. 19: Konštrukcia CO₂ laseru [42]

CO₂ lasery s pozdĺžnym rýchlym prúdením dosahujú výkony 500 – 5000 W na jeden meter dĺžky rezonátoru. Aktívny plyn prúdi dutinou laseru vysokou rýchlosťou, chladenie plynu sa zabezpečuje mimo tejto dutiny. Horšia kvalita rezu je zapríčinená častou fluktuáciou módu. Táto konštrukcia je aj vo variante s priečnym prúdením, kde laserový zväzok, prúdenie plynu a elektrický výboj sú v troch rôznych smeroch. Používané lasery v tomto prevedení sa používajú do 20 kW, najmä pre zváranie a tepelné úpravy, pre aplikácie rezania len veľmi málo.



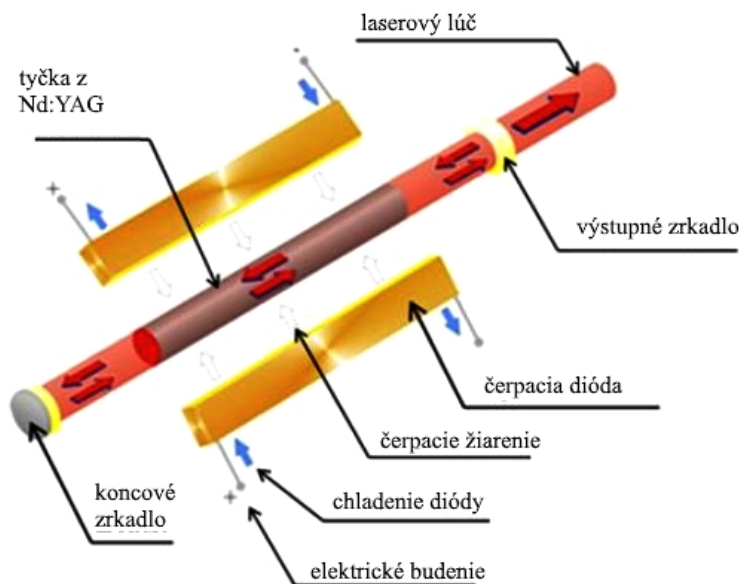
Obr. 20: Konštrukcia SLAB laseru [42]

SLAB lasery vytvárajú plazmu v malom priestore lichobežníkového prierezu medzi dvoma doskami (obr. 20). Termín SLAB označuje tvar výboja. Ten je udržiavaný pomocou dvoch elektród, ktoré zároveň zabezpečujú chladenie zmesi difúzne. Tieto lasery sú oveľa výkonnejšie než konvenčné zariadenia a až 10-násobne menšie.

Nakoľko je nutné dopĺňať plyny unikajúce v aktívnom prostredí a konštrukcia týchto laserov je pomerne zložitá, používa sa špeciálna optika sú vyššie aj prevádzkové náklady.

2.2.2 Nd:YAG lasery [7], [12], [38], [40], [43], [44], [45], [46], [47]

Najpoužívanejším typom pevnolátkových laserov je Nd:YAG laser. Aktívnym médiom je tu izotropný kryštál Yttrium Aluminium Granátu ($Y_3Al_5O_{12}$) dopovaný iónmi neodýmu (Nd^{3+}). Tento kryštál je v súčasnosti veľmi dôležitý pre granátové lasery, keďže je zvládnutá technika jeho pestovania a opracovania do tvaru tyčí, alebo diskov pri zachovaní najvyššej optickej kvality. Typická vlnová dĺžka emitovaná z Nd:YAG laseru je $1,064\mu m$. S menšou účinnosťou môžu tieto lasery emitovať žiarenie o vlnových dĺžkach 0,940, 1,120, 1,320 a $1,440\mu m$. Čerpanie kryštálu

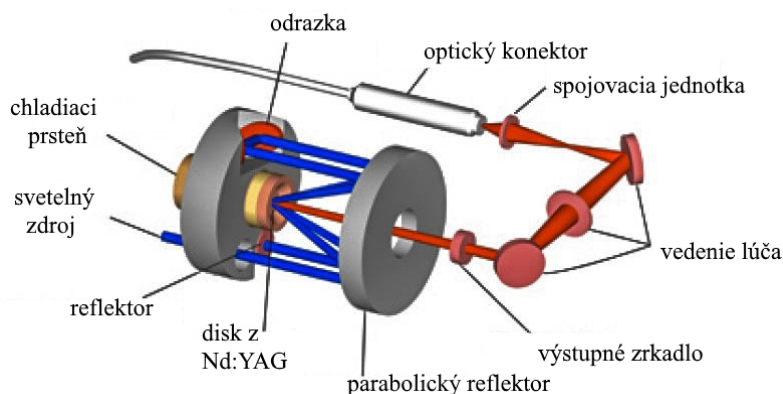


Obr. 21: Konštrukcia Nd:YAG tyčkového laseru [40]

je vykonávané buď pomocou kryptónovej výbojky – lampy (dnes už zastaralá metóda, nepoužíva sa), alebo poľom polovodičových diód. Budiace diódy majú vysoký výkon, no veľkú rozbiehavosť lúča, čo však nie je problém napr. u diskových laserov tohto typu. Laserový zväzok je modulovaný špeciálnym kryštálom ovládaným RF signálom. Lasery pracujú v kontinuálnom

(CW) aj pulznom režime. Maximálny výkon v kontinuálnom režime dosahuje hodnoty niekoľko stoviek wattov. V impulznom režime sa dĺžka impulzu môže v závislosti na druhu modulácie akosti rezonátoru pohybovať v rozmedzí od mikrosekúnd až po jednotky pikosekúnd, a teda aj výkon môže byť veľmi vysoký, avšak na krátky čas. K vedeniu laserového výkonu z Nd:YAG laserového zdroja sa používa optické vlákno, ktoré však nie je aktívne, len prenáša výkon do skenovacej hlavy. Tieto lasery majú veľmi nízku účinnosť, len okolo 2 – 3%. Tyčový Nd:YAG laser nachádza uplatnenie pri značení a gravírovaní kovov a plastov.

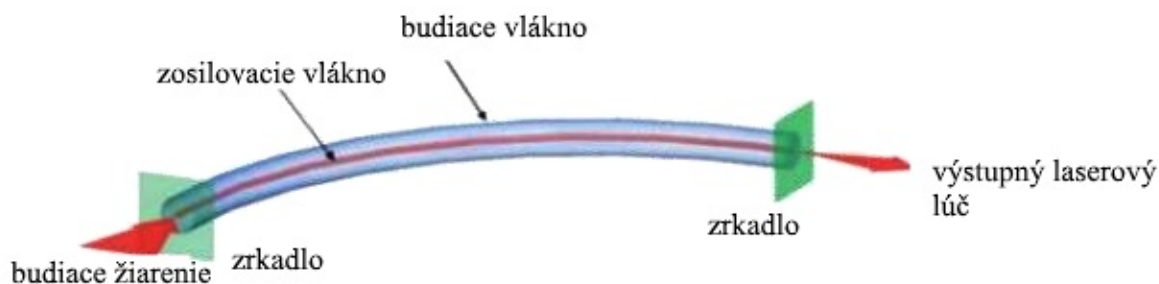
Diskový typ Nd:YAG laseru (vlnová dĺžka $1,03 \mu\text{m}$) je v princípe rovnaký ako tyčový Nd:YAG laser, no v tomto prípade je aktívne prostredie tvorené diskom, ktorého výška je niekoľko desiatín milimetru a jeho priemer približne do 10 mm. Disk je zároveň zadné zrkadlo optického rezonátoru. Vďaka geometrii disku dosahuje tento laser vysokú kvalitu lúča. Výkon je počas procesu stabilný a prevádzkové náklady sú minimálne. Vedenie lúča, elektrické napájanie, chladenie a riadenie laseru je modulárne. Oblúbené sú vďaka svojej kompaktnosti a vysokej účinnosti (až 30%). Lasery tohto typu začala vyrábať firma Trumpf.



Obr. 22: Konštrukcia diskového Nd:YAG laseru [40]

2.2.3 Vláknové lasery [31], [40], [48], [49]

Vláknový laser vznikol náhradou aktívneho média v štandardnom pevnolátkovom tyčovom Nd:YAG laseri vláknom. Skladá sa z vnútorného optického vlákna, ktoré tvorí aktívne médium a dutého optického vlákna, ktoré tvorí zrkadlový plášť (obr. 23). Aktívne optické vlákno je z kremičitého skla, ktoré má priemer niekoľko mikrometrov a je dlhé niekoľko metrov. Táto konštrukcia zabezpečuje lepšie chladenie a kvalitu laserového lúča.



Obr. 23: Schéma vláknového laseru [40]

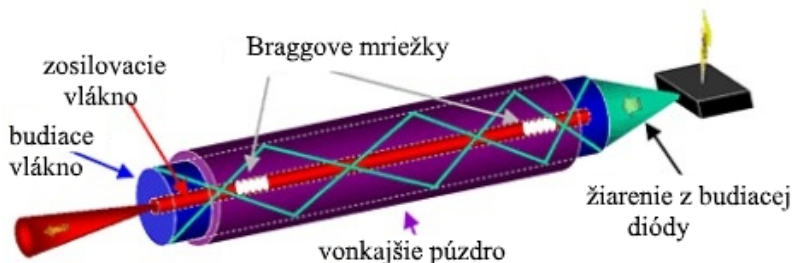
Optické vlákno je dotované prvkami vzácnych zemín (ytterbium Yb, erbium Er alebo thulium Tm). Dotujúce prvky majú vplyv na vlnovú dĺžku laserového lúča. Rezonátor je vytvorený pomocou Braggových mriežok, ktoré fungujú na princípe selektívneho odrazu vlnových dĺžok.

Vláknové lasery používajú optické čerpanie, najčastejšie pomocou laserových (LED) diód. Zdroj tohto čerpania môže byť samostatná dióda, pole, alebo viacero samostatných čerpacích diód, každá opatrená spojovacím vláknom. Žiarenie z budiacej LED diódy je zaoštroené na vonkajšie púzdro, ktoré sa správa ako odrazové zrkadlo, čím sa iniciuje stimulovaná emisia laserového žiarenia. Lúč je optickým vláknom vedený až do miesta rezu.

Vláknový laser pracuje na vlnovej dĺžke $1,07\ \mu\text{m}$. Ostatné druhy laserov sú veľmi citlivé na nárazy, klepnutia nakoľko na vedenie lúča musí byť použité vlákno, prípadne sústava zrkadiel. U vláknového laseru je lúč generovaný vo vnútri optického vlákna, takže prenos lúča nevyžaduje žiadnu špeciálnu citlivú optiku, je stabilný

a to výrazne uľahčuje používanie týchto laserov. Laserový lúč sa vyznačuje vysokou kvalitou. Vďaka tomu, že sa generuje vo vnútri optického vlákna je veľmi priamy a môže byť zaoštroený do veľmi malého bodu. Čím je tento bod menší, tým je použitie laseru pre rezanie efektívnejšie. Vláknové lasery môžu dosahovať vysoké výkony až do hodnoty približne 100 kW. Ich účinnosť je pomerne vysoká a pohybuje sa okolo 50%. Vďaka jeho špecifickej konštrukcii je chladenie jednoduché. Ostatné lasery sú schopné preniesť len malé percento výkonu ktorý je do nich vložený, no vláknový laser prenáša 70 – 80% tohto výkonu. Teplo zo zdroja je rozptýlené po celej dĺžke vlákna, čo ho chráni pred porušením vplyvom vysokej teploty.

Vláknové lasery sa používajú najmä na rezanie tenkých oceľových plechov, no výborné výsledky dosahuje aj pri rezaní hliníku, medi a ich zliatin. Používajú sa hlavne kvôli ich kompaktnosti a jednoduchšej konštrukcii a taktiež nízkym prevádzkovým nákladom.



Obr. 24: Princíp vláknového laseru [49]

2.3 Oxidačné rezanie [37], [38], [39], [40], [50], [51]

Oxidačné rezanie sa používa takmer výlučne pre kovy, a to najmä pre konštrukčné uhlíkové oceli, nízkoalegované oceli, titán, príp. meď. Ako procesný plyn slúži kyslík, ktorý podporuje horenie a tým pádom lokálne zvýšenie teploty v oblasti rezu. Materiál v okolí štrbiny je ohriaty na vysokú teplotu a následne vylúčený v podobe roztavenej strusky prúdom plynu (tlak plynu sa pohybuje v rozmedzí 0,5 – 5 bar). Prebieha tu exotermická reakcia podobne ako pri rezaní kyslíkom. Energia spôsobená reakciou kovu s kyslíkom sa chová ako ďalší zdroj energie. Je päťnásobne väčšia ako



Obr. 25: Poloha ohniska pri oxidačnom rezaní [40]

Prebieha tu exotermická reakcia podobne ako pri rezaní kyslíkom. Energia spôsobená reakciou kovu s kyslíkom sa chová ako ďalší zdroj energie. Je päťnásobne väčšia ako

energia laserového lúča, čo zvyšuje reznú rýchlosť a nie sú tak veľké nároky na výkon lasera. Spotreba rezného plynu je približne $2Nm^3.hod^{-1}$, čo je menej ako je tomu u tavného spôsobu delenia. Ohnisko laserového lúča je zaostrené pod povrch hornej plochy ako ukazuje obr. 25.

Výhoda oproti tavnému rezaniu sa prejavuje pri väčších hrúbkach materiálu (možno rezať materiály hrúbky približne 25 – 30 mm), kedy je možné znížovať tlak plynu a výkonu, alebo je vytvorená väčšia tepelná plocha rezu, kde už plyn nemá priestor unikať do okolia. Tento efekt vedie k podstatnej úspore procesných plynov.

Vysoká rezná rýchlosť ako aj samotné použitie kyslíka ako rezného plynu zapríčiňuje tvorbu oxidickej vrstvy (okují), čo zhoršuje kvalitu a drsnosť reznej hrany, prípadne tvorbu korózie. Je možné rezať aj koróziivzdornú oceľ, no je nutné počítať s tvorbou oxidickej vrstvy, ktorá je tvrdá a ťažko odstrániteľná. Prítomnosť oxidickej vrstvy spôsobuje tiež problémy pri povlakovaní ocelí. Oproti tavnému spôsobu vzniká väčšia tepelne ovplyvnená oblasť. Pri tomto spôsobe delenia je nutné dbať na úpravu povrchu a čistotu procesného plynu (čím je kyslík čistejší, tým rýchlejšie prebieha dej), v tomto prípade kyslíku. Oxidačný spôsob rezania je vďaka uvedeným výhodám najviac používaný spôsob delenia.

2.4 Tavné rezanie [37], [38], [39], [40], [50], [51]

Pri tomto spôsobe rezania laserový lúč spôsobuje natavenie materiálu v štrbine. Roztavený kov sa zo škáry odstraňuje prúdom inertného plynu smerom dolu. Vďaka rýchlemu vyfúknutiu materiálu zo škáry vzniká len veľmi malá tepelne ovplyvnená oblasť. Aby vyfúknutie bolo dostatočne rýchle a tavenina sa nenalepovala na spodnú hranu musí tlak plynu dosahovať pomerne vysoké hodnoty (8 – 20 bar), čo sa prejaví na vyššej spotrebe procesného plynu ($50Nm^3.hod^{-1}$). Tlak sa volí s ohľadom na viskozitu taveniny. Ako inertný plyn sa väčšinou využíva dusík (N_2), prípadne argón (Ar), ktoré zabraňujú oxidácii reznej hrany, čo je hlavná výhoda tavného spôsobu delenia. Materiály rezané touto metódou môžu obsahovať sklo, plasty, či niektoré kovy, veľmi vhodná je táto metóda pre nerezové oceli a farebné kovy, hliník a jeho zliatiny. Rezné rýchlosti sú vyššie ako u sublimačného rezania, no oveľa nižšie ako pri oxidačnom rezaní.



Obr. 26: Poloha ohniska pri tavnom rezaní [40]

Ohnisko laserového lúča je zaostrené bližšie k spodnej hrane plochy obrobku, ako naznačuje obr. 26. Pri tejto metóde sa používajú vyššie výkony laserov. V porovnaní s oxidačným rezaním je tu lepšia kvalita rezu, drsnosť reznej hrany. Rovnako ako pri oxidačnom spôsobe delenia je aj tu dôležitá čistota plynu. Pokiaľ je dusík kontaminovaný kyslíkom, dochádza k nežiadúcej oxidácii reznej hrany. Oxidačný a tavný spôsob delenia sú z hľadiska uplatnenia v priemysle najpoužívannejšie metódy delenia laserom.

2.5 Parametre rezného procesu [38], [39], [52]

Na kvalitu rezného procesu má vplyv mnoho parametrov. Parametre rezného procesu závisia na charakteristike lúča, požadovanej rýchlosti rezania, zložení a hrúbke rezaného materiálu a požadovanej výslednej kvality reznej hrany. Voľbou vhodných parametrov laseru a obrobku je možno dosiahnuť odpovedajúcu kvalitu rezu. Prípadné vady rezu, či iné nedostatky môžu súvisieť s príliš nízkou rýchlosťou rezania a jej kolísaním, zmenou výkonu, priestorovým rozdelením

Tab. 2.1 Rozdelenie parametrov [39]

Parametre laseru	Výkon laseru Stabilita výkonu Prierez lúča Divergencia Polarizácia
Parametre obrobku	Materiál obrobku Hrúbka obrobku Stav povrchu obrobku Geometria obrobku
Procesné parametre	Rezná rýchlosť Druh plynu Tlak plynu Ohnisko Typ a priemer trysky

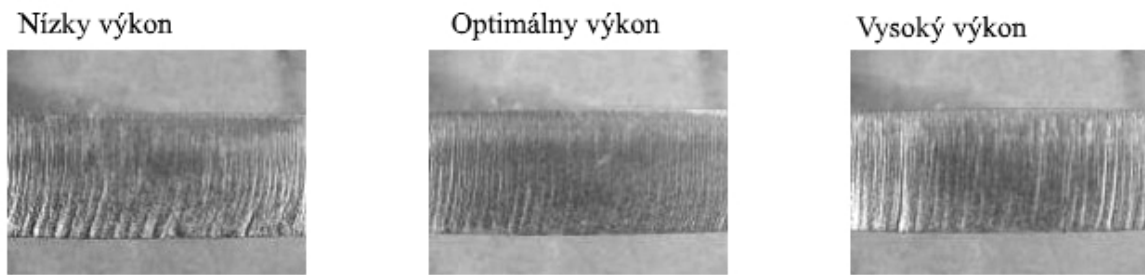
intenzity, či poruchami optickej integrity. Parametre delíme na parametre laseru, parametre procesu a parametre obrobku, viď tab. 2.1. K dosiahnutiu dobrých výsledkov rezania je nutná ich optimalizácia. Niektoré z nich nie sú prístupné pre obsluhu stroja. Zaraďujeme sem aj tepelné a fyzikálne vlastnosti a tiež konštrukciu (zostavenie) častí laseru. Najdôležitejšie parametre a ich dopad na rezný proces budú popísané v nasledujúcom texte.

2.5.1 Výkon laseru [38], [39], [40], [53]

Laserový výkon je celková energia emitovaná vo forme laserového svetla za jednotku času (za sekundu). Optimálna hodnota výkonu sa nastavuje pre daný proces zvlášť podľa potreby, nakoľko závisí na rezanom materiáli a jeho hrúbke. Vyšší výkon môže spôsobiť veľkú šírku štrbiny, hlbšie značenie, prepálenie povrchu, tepelné poškodenie a poškodenie okrajov. Naopak nízka hodnota výkonu môže viesť k nedostatočnej iniciácii procesu rezania, prípadne úzku štrbinu s plytkým značením. Výkon sa rovnako ako v sústave SI vyjadruje v jednotkách Watt [W], prípadne percentom z maximálneho výkonu laseru. Nastavením výkonu sa súčasne riadi vnesené teplo do miesta rezu. Na obr. 27 sú zobrazené vzorky hrubšieho materiálu rezaného za použitia nízkeho, optimálneho a príliš vysokého výkonu.

2.5.2 Rezná rýchlosť [38], [39], [40], [52], [53]

Podobne ako výkon aj rezná rýchlosť závisí na druhu rezaného materiálu a jeho hrúbke. Výkon laseru, rezná rýchlosť musia byť navzájom zladené parametre, aby nedochádzalo k nežiadúcim vadám. Nízka rýchlosť vzhľadom k zvolenému vysokému výkonu môže viesť k prepáleniu



Obr. 27: Vplyv rezného výkonu na kvalitu reznej hrany [40]

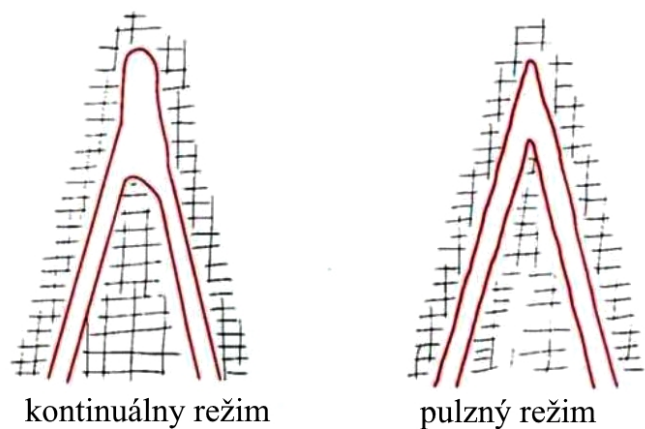
a vysokému nárastu drsnosti v mieste rezu. Naopak príliš vysoká rýchlosť a nízky výkon spôsobujú vznik otrepov, prípadne nie je proces rezania vôbec iniciovaný, t. z. nevzniká rezná štrbina, ale len drážka. So vzrastajúcou reznou rýchlosťou sa vytvárajú pruhy a tavenina ostáva na spodnej strane. V prípade použitia kyslíku ako rezného plynu pri delení mäkkých ocelí vznikajú už spomínané priepaly a zväčšuje sa šírka tepelne ovplyvnenej oblasti. Vo všeobecnosti platí, že rezná rýchlosť je nepriamo úmerná hrúbke materiálu, t. z. rezná rýchlosť klesá so vzrastajúcou hrúbkou materiálu. V prípade rezania ostrých hrán, či rohov je nutné znížiť rýchlosť aj výkon. Na obr. 28 sú zobrazené vzorky hrubšieho materiálu rezaného za použitia nízkej, optimálnej a príliš vysokej rýchlosti.



Obr. 28: Vplyv reznej rýchlosti na kvalitu reznej hrany [40]

2.5.3 Kontinuálny (cw) a pulzný (p) režim laserového lúča [38], [39], [52], [53]

Kontinuálny režim lúča sa používa hlavne tam, kde sa vyžaduje hladkých rezov za použitia vysokých rezných rýchlostí, obzvlášť pre rezanie hrubších materiálov, nakoľko je dosahovaný vzhľadom k reznej rýchlosti pomerne vysoký výkon. Avšak odstránenie nataveného materiálu nie je dostatočné a môže dôjsť k prenosu tepla z nataveného materiálu do reznej hrany, a tým ku vzniku väčšej tepelne ovplyvnenej oblasti a teda k zhoršeniu kvality reznej hrany. Pulzný režim sa odporúča pri presnom rezaní jemných súčastí s vysokou tepelnou vodivosťou.

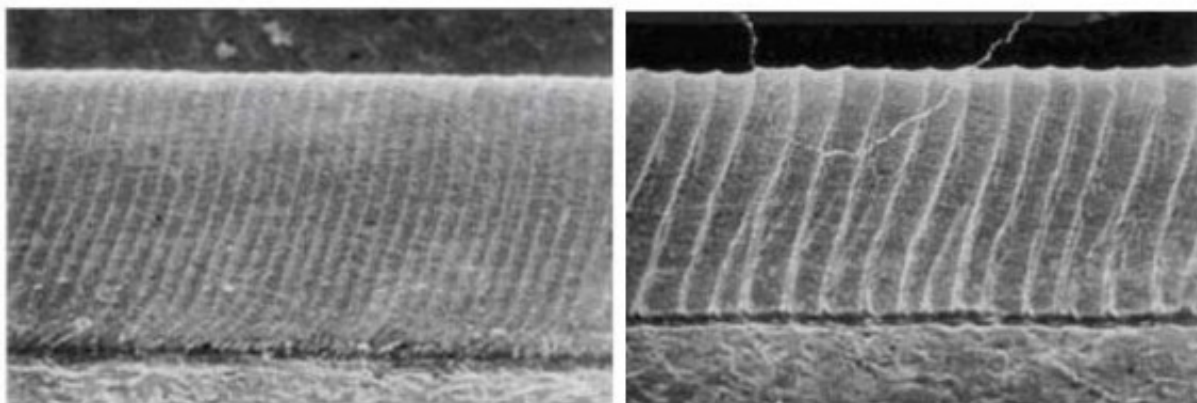


Obr. 29: Vplyv režimu na kvalitu prevedenia rezu [53]

ťou (vysoké výkony v krátkych pulzoch zaisťujú efektívne rozloženie tepla) a pri rezaní okolo ostrých hrán alebo súčastí so zložitejšou geometriou. Ako ukazuje obr. 29 hrany vzniknuté pulzným režimom sú ostrejšie ako v prípade kontinuálneho režimu.

2.5.4 Druh a tlak procesného plynu [38], [39], [52], [53]

Výber procesného plynu ovplyvňuje najmä druh rezaného materiálu a požiadavky kladené na výslednú kvalitu rezu. S tým súvisí aj výber metódy rezania (oxidačné, tavné rezanie) popísané v kapitole 2.3 a 2.4.

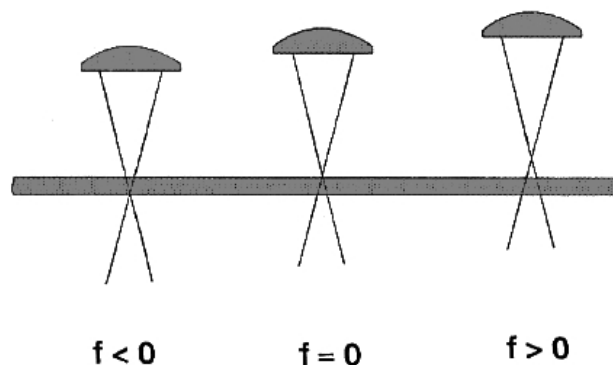


Obr. 30: Porovnanie rezných hrán pri použití kyslíku, resp. dusíku [53]

Dusík sa používa prevažne pre rezanie koróziivzdorných ocelí, vysokolegovaných ocelí, hliníkových a niklových zliatin, pri ktorých je nutné použitie vyšších tlakov na odstránenie roz-taveného kovu z reznej štrbiny. Hlavným problémom pri použití dusíka je nežiadúce lepenie neodstránenej taveniny na spodnú časť reznej hrany. Správnou optimalizáciou parametrov môže byť táto vada odstránená. Tlak dusíka sa pohybuje v rozmedzí 10 – 20 bar a jeho čistota by mala dosahovať hodnotu 99,8%. Kyslíkom sa efektívne režu mäkké a nízkelegované ocele. Problémom pri použití kyslíku je vznik oxidickej vrstvy, takže je nutné kontrolovať rezné parametre k eliminácii vzniku tejto vrstvy. Tlak kyslíka sa pohybuje medzi 0,5 – 5 bar a jeho čistota by mala mať hodnotu 99,9%. Obr. 30 ukazuje porovnanie rezných rýchlostí a maximálnych hrúbok materiálu pri použití kyslíka, resp. dusíka ako procesného plynu.

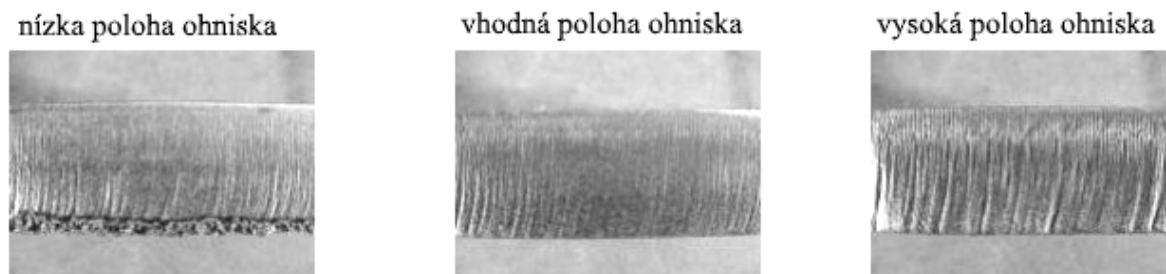
2.5.5 Poloha ohniska laserového lúča [38], [39], [40] [52], [53]

Dôležitým parametrom rezného procesu je tiež správna poloha ohniska. Má významný vplyv na kvalitu rezu. Ohnisko môže byť umiestnené nad alebo pod úrovňou povrchu obrobku v závislosti od použitého druhu materiálu, ako ukazuje obr. 31. V prípade rezania kyslíkom je najväčšia rezná rýchlosť dosahovaná, ak je ohnisko umiestnené na povrchu v prípade tenkých plechov. U hrubších plechov je vhodné umiestnenie približne 1/3 hrúbky pod povrchom plechu. V prípade



Obr. 31: Umiestnenie ohniska laserového lúča [53]

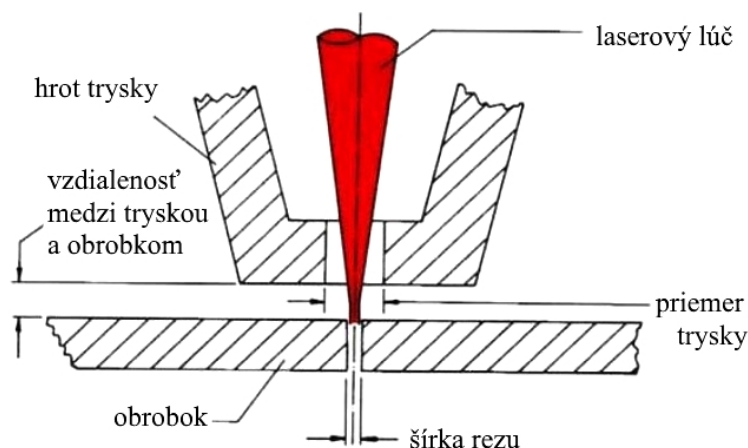
použitia inertného plynu je správna pozícia bližšie k spodnej rovine plechu nakoľko sa tvorí väčšia štrbina, čo umožňuje prienik väčšieho množstva rezného plynu, a tým ľahšiemu vyfúknutiu nataveného materiálu. Ak je rovina ohniska umiestnená vysoko alebo príliš nízko vzhľadom k povrchu obrobku, šírka rezu a hrúbka natavenej vrstvy vzrastá a stúpa do bodu, v ktorom hustota výkonu klesne pod hodnotu potrebnú na rezanie. Obr. 32 znázorňuje vplyv ohniskovej vzdialenosti na kvalitu rezu.



Obr. 32: Vplyv polohy ohniska na kvalitu rezu [40]

2.5.6 Priemer trysky a jej vzdialenosť od obrobku [38], [39], [53]

Tvar trysky, najmä jej ústia určuje optimálne prúdenie rezného plynu, čím je ovplyvnená aj kvalita rezu. Priemer trysky sa pohybuje v rozmedzí 0,8 – 3 mm a volí sa v závislosti na druhu materiálu a jeho hrúbke. Funkciou trysky je dopravenie rezného plynu do určitej vzdialenosti nad materiál a zabezpečenie koaxiálneho prúdenia plynu s laserovým lúčom. Tryska taktiež stabilizuje tlak, ktorý je kladený na povrch obrobku, čím sa minimalizujú turbulencie v tavenine. Len malá časť prúdu plynu sformovaného tryskou preniká do štrbiny a preto je nutné použitie vysokého tlaku plynu.



Obr. 33: Funkcia trysky pri laserovom delení [53]

Vzdialenosť medzi tryskou a obrobkom, vid' obr. 33 má priamy vplyv na rezný výkon a kvalitu rezu, nakoľko ovplyvňuje profil prúdenia v plynach. Všeobecne sa odporúča vzdialenosť menšia než priemer trysky, pretože väčšie vzdialenosti môžu viesť k značným turbulenciám a zmenám tlaku v medzere medzi tryskou a obrobkom. Menšia vzdialenosť trysky od obrobku spôsobí, že štrbina sa správa ako tryska a geometria trysky nespôsobuje také značné tlakové rozdiely a turbulencie. Ak sa ale nedodrží určitá vzdialenosť, môže jej prípadný dotyk s materiálom spôsobiť porušenie trysky prípadne by mohlo dôjsť ku kontaminácii optiky vplyvom rozstrieknutia taveniny. Pri oxidačnom rezaní je odstup trysky približne 1,5 mm, u tavného spôsobu 0,3 mm.

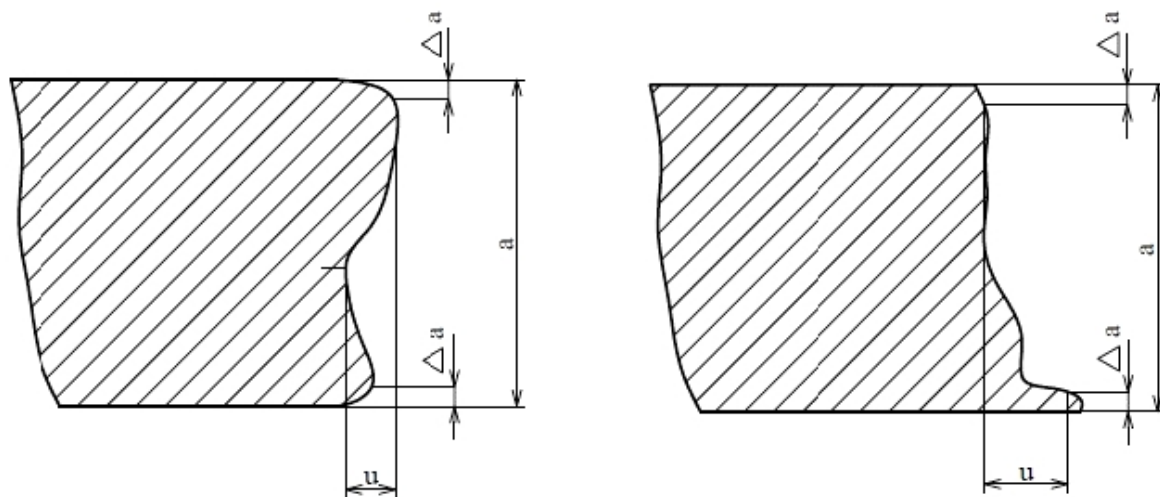
2.6 Kvalita a drsnosť rezu [11], [38], [54], [55]

Posudzovaním kvality rezu pri tepelnom delení materiálu sa zaoberá norma ISO 9013. Zahŕňa geometrické požiadavky na výrobky a odchýlky akosti povrchu rezu. Platí pre rezy plameňom v rozmedzí 3 – 300 mm, rezy plazmou v rozmedzí 1 – 150 mm a rezy laserom od 0,5 – 40 mm. Hlavné parametre určujúce kvalitu rezu sú:

- odchýlka kolmosti alebo odchýlka uhlu „u“
- priemerná výška prvkov profilu Rz_5

Ďalšie parametre, ktorými možno posúdiť kvalitu rezu sú:

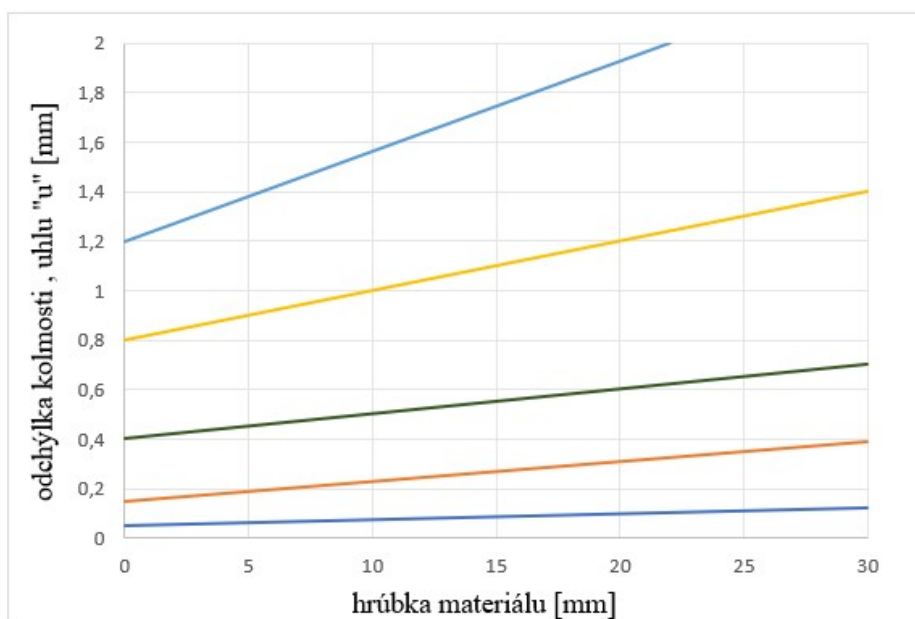
- sklz „n“
- nastavenie hornej hrany „r“
- výskyt okují alebo natavených kvapiek na dolnej strane rezu



Obr. 34: Odchýlka kolmosti [54]

Odchýlka kolmosti, resp. odchýlka uhlu „u“ je vzdialenosť medzi dvoma rovnobežnými priamkami medzi ktorými je vpísaný profil povrchu rezu, viď obr. 34. Priamky zvierajú s povrchom rezaného materiálu určený uhol. V prípade zvislých rezov je to 90° . Meraná oblasť je zmenšená o vzdialenosť Δa od hornej a od dolnej hrany rezu. Δa je nastavenie hrany rezu, ktorá nie je započítaná. Kóta „a“ znázorňuje hrúbku materiálu. Norma taktiež uvádza tolerančné pole pre odchýlku kolmosti, príp. odchýlku uhlu, viď tab. 2.2 ako aj jej závislosť na hrúbke spracovávaného kusu, viď obr. 35.

Priemerná výška profilu Rz_5 , obr. 36, je aritmetický priemer z jednotlivých výšok profilu z piatich po sebe idúcich úsekoch. Meranie tohto parametru sa vykonáva jedenkrát na jeden meter dĺžky na mieste, kde je predpokladaná najväčšia drsnosť profilu. U laserového rezania sa je to v $1/3$ hrúbky rezu od hornej reznej hrany. V prípade hrúbky rezu menej ako 2 mm sa meria v polovici hrúbky rezu. Norma uvádza tolerančné pole kvality rezu pre priemernú výšku prvkov profilu Rz_5 , viď tab. 2.3 ako aj jej závislosť na hrúbke spracovávaného kusu, viď obr. 38.



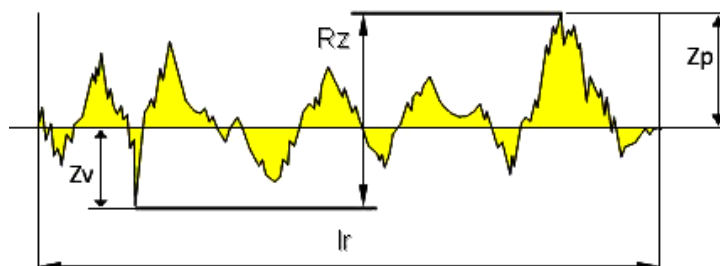
Obr. 35: Graf závislosti hrúbky materiálu a odchýlky kolmosti, resp. uhlu [54]

Tab. 2.2 Tolerančné pole odchýlky kolmosti [54]

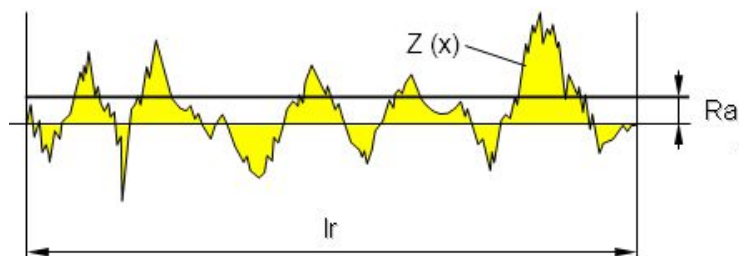
Tolerančné pole	Odchýlka kolmosti alebo uhlová odchýlka „u“ [mm]
1	$0,05 + 0,003 \cdot a$
2	$0,15 + 0,007 \cdot a$
3	$0,4 + 0,01 \cdot a$
4	$0,8 + 0,02 \cdot a$
5	$1,2 + 0,035 \cdot a$

Pre posúdenie drsnosti povrchu bol okrem parametru Rz_5 použitý aj parameter Ra , t. z. stredná aritmetická odchýlka profilu definovaná ako priemer absolútnych hodnôt výšok profilu, viď obr. 37. Nerovnosti sú určené celým rozsahom základnej dĺžky l_r .

Norma ISO 9013 ďalej určuje požiadavky na meradlá, ktorými sú jednotlivé parametre kvality rezu merané. Sú rozdelené na meradlá pre hrubé meranie a meradlá pre presné meranie. Takisto sú definované aj podmienky merania.



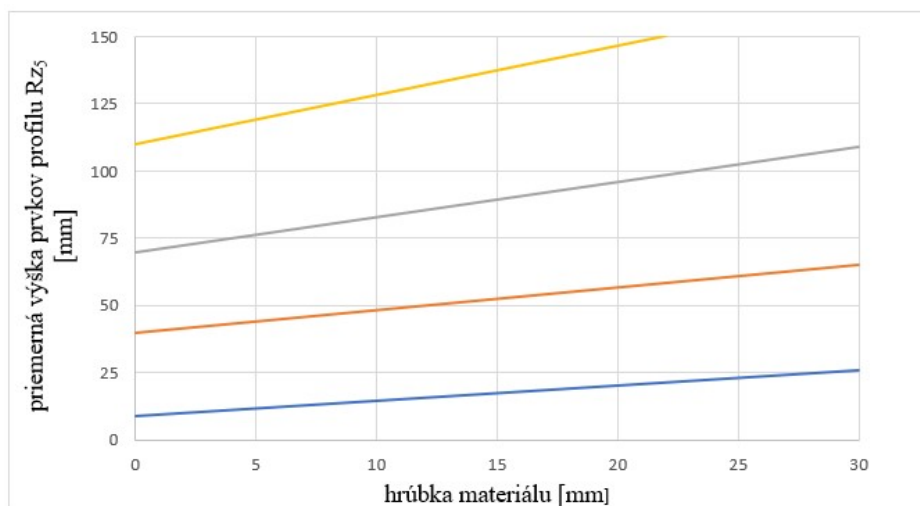
Obr. 36: Najväčšia výška profilu Rz [55]



Obr. 37: Priemerná aritmetická odchýlka profilu Ra [55]

Tab. 2.3 Tolerančné pole parametru Rz_5 [54]

Tolerančné pole	Priemerná výška profilu Rz_5
1	$10 + 0,6 \cdot a$
2	$40 + 0,8 \cdot a$
3	$70 + 1,2 \cdot a$
4	$110 + 1,8 \cdot a$
5	$1,2 + 0,035 \cdot a$



Obr. 38: Závislosť hrúbky materiálu na parametre Rz_5 [54]

2.7 Taguchi metóda [56], [57], [58], [59]

Taguchi metódu vyvinul Dr. Genichi Taguchi z Japonska, významný inžinier a štatistik. Ide o štatistický prístup vedúci k optimalizácii procesných parametrov a zlepšeniu kvality vyrábaných súčastí. Pôvodne bola určená pre kontrolu kvality potravín, no neskôr našla svoje uplatnenie v mnohých inžinierskych oblastiach. Zlepšuje kvalitu existujúcich výrobkov a procesov, a zároveň významne redukuje náklady spojené s obsiahlym vývojom, ktorý by musel byť bez použitia tejto metódy uskutočnený. Je možno definovať ako daná technológia ovplyvňuje konečný produkt jednotlivými parametrami bez toho, aby bolo nutné previesť veľké množstvo experimentov, ako je tomu napríklad u plne faktoriálnej metódy. Tab. 2.4 znázorňuje ako sa zvyšuje množstvo experimentov u plne faktoriálnej metódy, kde sa berú do úvahy kombinácie všetkých známych faktorov.

Tab. 2.4 Počet potrebných experimentov pri plne faktoriálnej metóde [58]

Počet parametrov „m“	Počet úrovní „L“	Počet experimentov „N“	Graf
1	1	1	
2	2	4	
4	2	16	
3	4	64	
7	2	128	

Taguchi metóda sa od ostatných líši najmä v tom, že nehľadí na konečnú kvalitu produktu, t.z. až na konci výrobného procesu, ale sa kvalite venuje „preventívne“ počas priebehu designu produktu. Inými slovami, pokiaľ je teda výrobok zle navrhnutý, nemôže kontrolou kvality výrob-

kov dôjsť k požadovanej kvalite. Myšlienkou Dr. Taguchiho je, že 80% kvality výrobku závisí na technológii výroby a len 20% na obsluhu. Je to rozdielny prístup od tých konvenčných, ktoré zaraďujú produkty do tolerančného poľa. Taguchi metóda považuje za správny výrobok ten, ktorý úplne spĺňa všetky požiadavky. Určenie parametrov Taguchi metódou sa riadi pomocou nasledujúcich krokov:

- identifikácia hlavnej funkcie a jej vedľajších účinkov
- identifikácia faktorov ruchu, podmienky testovania a kvalitatívne charakteristiky
- určenie cieľovej funkcie, ktorá má byť optimalizovaná
- určenie kontrolných faktorov a ich úrovně
- výber vhodného ortogonálneho poľa a konštrukcia matice
- vykonanie experimentu pomocou matice
- preskúmanie dát; predpoveď optimálnej úrovne kontrolných faktorov
- vykonanie verifikačného experimentu

2.7.1 Príklad aplikácie Taguchi metódy [59]

V prvom kroku je nutná presná definícia aktuálneho stavu. To znamená presné porozumenie procesu, ktorý má byť optimalizovaný ako aj všetkých faktorov, ktoré tento proces ovplyvňujú. Parametre procesu môžu byť napr. rezná rýchlosť, výkon stroja, hĺbka záberu, a pod. Úroveň ukazuje v koľkých hodnotách chceme dané parametre skúmať a odvíja sa z nej tiež množstvo stupňov voľnosti. Takisto je potrebné určiť úrovne faktorov, viď tab. 2.5. Značenie H 1-9 odpovedá určitej hodnote parametru, napr. hodnota reznej rýchlosti, výkonu apod.

Tab. 2.5 Voľba parametrov a úrovní pre Taguchi metódu [59]

PARAMETER	ÚROVEŇ PARAMETRU		
	1	2	3
A	H1	H2	H3
B	H4	H5	H6
C	H7	H8	H9

Pokiaľ je toto známe, možno prejsť na určenie veľkosti ortogonálnych polí „OA“ (z angl. slova orthogonal arrays t.z. ortogonálne polia). Ide o kombinačnú tabuľku, ktorá slúži neskôr pre samotné prevedenie experimentu. Táto tabuľka bola definovaná Dr. Genichi Taguchim a dostatočne kombinuje všetky určené parametre a ich úrovne, viď tab. 2.6. Pre určenie vhodného ortogonálneho poľa je nutné najskôr určiť stupne voľnosti. V prípade z tab. 2.6 platí:

- stupne voľnosti - 1 stupeň voľnosti pre základnú hodnotu a $8 = 2.4$ (vždy dve pre zostávajúci faktor)

Spolu máme 9 stupňov voľnosti, a preto najvhodnejšie ortogonálne pole bude L9. Bude teda nutné uskutočniť 9 experimentov, ako ukazuje tab. 2.6. Po definovaní tejto ortogonálnej tabuľ-

Tab. 2.6 Voľba ortogonálnych polí

Č. EXPERIMENTU	PARAMETER		
	1	2	3
1	1	1	1
2	1	2	2
3	1	3	3
4	2	1	3
5	2	2	1
6	2	3	2
7	3	1	2
8	3	2	3
9	3	3	1

ky nasleduje uskutočnenie experimentu. Výsledky môžu byť následne vyhodnotené pomocou ANOVA analýzy (z angl. slova analysis of variation). Ide o metódu, ktorá vyhodnocuje vplyv jednotlivých faktorov na výsledky experimentov v %.

3 EXPERIMENTÁLNA ČASŤ

Experimentálna časť diplomovej práce je zameraná na optimalizáciu parametrov laserového rezačieho stroja od firmy Trumpf, obr. 39, ktorý vlastní firma ACO Industries k.s. Ide o pevnolátkový laser, ktorého technické parametre sú uvedené v tab. 3.1. Parametre boli optimalizované ako pre tavný, tak aj pre oxidačný spôsob laserového rezania. Po dohovore bola experimentálna časť rozšírená o meranie a optimalizáciu parametrov pre laserové rezanie stlačeným vzduchom. Delenie vzoriek prebiehalo vo firme ACO Industries k. s. v Příbyslavi a následné vyhodnotenie vzoriek z hľadiska kvality a drsnosti povrchu v laboratóriu na Ústave prístrojovej techniky AV ČR v Brne pod vedením doc. RNDr. Libora Mrňu, Ph.D.



Obr. 39: Ilustračný obrázok stroja [61]

Tab. 3.1 Technické údaje laseru [61]

Stroj - model	TruLaser 3030
Rozmery (d x š x v)	8800 x 6010 x 2400 mm
Maximálna rýchlosť, simultánne	140 $m.min^{-1}$
Pracovný rozsah	
Os x	3000 mm
Os y	1500 mm
Maximálna hmotnosť obrobku	900 kg
Maximálny výkon laseru	3000 W
Maximálna hrúbka plechu	
Konštrukčná oceľ	20 mm
Ušľachtilá oceľ	15 mm
Hliník	15 mm
Meď	6 mm
Mosadz	6 mm

3.1 Voľba materiálu

Vo firme ACO Industries k.s. sa reže prevažne koróziivzdorná oceľ a čierna oceľ. Pre účely optimalizácie parametrov bol použitý materiál, v priemyselnej praxi označovaný ako DC01 podľa normy EN. Ekvivalentom pre tento materiál v ČSN norme je ČSN 11320, príp. ČSN 11321. Ide o nízkouhlíkové ťažné oceli, spracované valcovaním za studena. Sú vhodné k hlbokému ťahaniu a taktiež sa vyznačujú dobrou zvariteľnosťou. Atest materiálu je v priložený v prílohe 2. Tento materiál bol použitý pre rezanie dusíkom a taktiež pre rezanie pomocou kyslíku a stla-

čeného vzduchu. V tab. 3.2 je dané chemické zloženie materiálu a tab. 3.3 udáva mechanické vlastnosti materiálu.

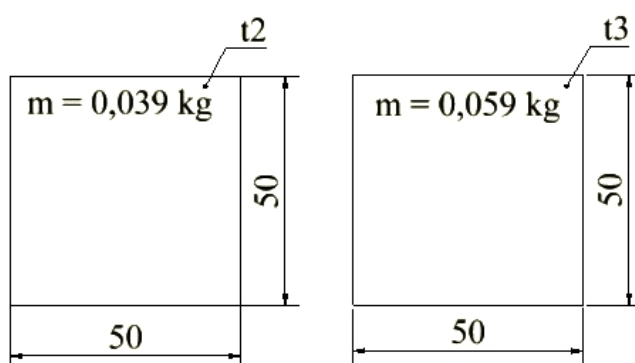
Tab. 3.2 Chemické zloženie materiálu DC01

CHEMICKÉ ZLOŽENIE					
Materiál	C	Mn	P	S	Si
DC01	0,031	0,175	0,006	0,009	0,005

Tab. 3.3 Mechanické vlastnosti materiálu DC01

CHEMICKÉ ZLOŽENIE			
Materiál	Medza klzu Re [MPa]	Medza pevnosti Rm [MPa]	Ťažnosť A[%]
DC01	198	313	40,1

Oceľ je dodávaná v plechových pásoch, ktorých rozmer je 1500 x 3020 mm. Pre účely práce boli prevedené experimenty na materiáloch hrúbky 2 mm a tiež 3 mm. Tvar vzoriek musí odpovedať reálnemu procesu. Najčastejšie sa pre optimalizáciu parametrov na laserovom centre používajú vzorky v tvare štvorca, ktoré môžu mať navyše vyrezané diery na roztečnej kružnici, príp. v strede tohto štvorca. Tvar vzoriek pre tento experiment bol určený v tvare štvorca, v rozmeroch 50 x 50 mm ako pri rezaní plechu hrúbky 2 mm tak aj pri rezaní plechu hrúbky 3 mm, bez dier (obr. 40), celková plocha vzorky je 2500 mm^2 .



Obr. 40: Parametre vzoriek

3.2 Príprava a priebeh experimentu

Na začiatku optimalizácie je nutné stanoviť tie faktory, ktoré zásadným spôsobom vplyvajú na rezný proces a je teda nutné ich optimalizovať a zaradiť pri vytváraní OA tabuliek medzi tzv. kontrolné parametre. Proces laserového delenia zásadným spôsobom ovplyvňujú nasledujúce 4 parametre:

- rezná rýchlosť,
- rezný výkon,
- tlak plynu,
- poloha ohniska.

Následne bola spracovaná tabuľka týchto parametrov (v rovnakom poradí, aké je uvedené vyššie, na základe dôležitosti) spolu s ich hodnotami. Tieto hodnoty boli stanovené na základe odporúčania od výrobcu laserového centra Trumpf. Tabuľky určujú vhodné nastavenie stroja podľa druhu rezaného materiálu a jeho hrúbky. Tie, ktoré boli použité v tomto experimente sú

uvedené v prílohe 3. Na základe skúseností z reálneho procesu v praxi boli ďalej tieto parametre zvýšené, či znížené o určitú hodnotu, až do hodnôt hraničiacich so vznikom vád, aby po uskutočnení experimentu bolo zjavné, ako jednotlivé parametre vplyvajú na rezný proces. Vzhľadom k výrobnej náročnosti boli zvolené štyri úrovne vyššie uvedených kontrolných parametrov. Rozloženie týchto parametrov v ortogonálnom systéme je znázornené v tab. 3.4. Z predchádzajúcich kapitol plynie, že sa jedná o Taguchiho tabuľku L16.

Značenie P1 – 4 značí jednotlivé parametre. Ako parameter 1 bola zvolená rezná rýchlosť, parameter 2 rezný výkon, parameter 3 tlak plynu a parameter 4 poloha ohniska. Ako už bolo spomenuté v predchádzajúcej kapitole, kontrola kvality rezu bola vykonaná pri rezaní plechu o hrúbke 2 mm a 3 mm, tavným aj oxidačným spôsobom laserového delenia. Z toho vyplýva, že bolo nutné spracovanie 4 rôznych variačných tabuliek spolu s hodnotami ich parametrov.

Tab. 3.4 Rozloženie parametrov a ich úrovní podľa Taguchi metódy

Č. EXPERIMENTU	P1	P2	P3	P4
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	1	4	4	4
5	2	1	2	3
6	2	2	1	4
7	2	3	4	1
8	2	4	3	2
9	3	1	3	4
10	3	2	4	3
11	3	3	1	2
12	3	4	2	1
13	4	1	4	2
14	4	2	3	1
15	4	3	2	4
16	4	4	1	3

3.2.1 Voľba parametrov pre rezanie dusíkom

Rezanie dusíkom umožňuje použitie vyšších rezných rýchlostí avšak je tu nutnosť nastavenia vyšších hodnôt tlaku rezného plynu potrebného na vyfúknutie taveniny z rezu. Najskôr bolo rezanie vykonané na plechu hrúbky 2 mm. Predvolená medzera rezu nebola menená a jej hodnota bola 0,17 mm a zvolená tryska mala priemer 2,3 mm. Tab. 3.5 uvádza zvolené kontrolné parametre. Priebeh rezania bol v kontinuálnom režime (cw).

Prvá úroveň parametrov predstavuje odporúčané nastavenie pre danú hrúbku a druh materiálu výrobcom laseru. Ďalšie úrovne boli potom posunuté o určitú hodnotu na základe skúseností, rozsahu a možností laseru tak, aby mohlo ich prípadnou zmenou dôjsť k urýchleniu procesu, príp. k zlepšeniu výslednej kvality rezu. Rozloženie týchto parametrov do Taguchiho tabuľky L16 je uvedené v tab. 3.6.

Na základe úvahy v priebehu experimentu boli rezané ďalšie dve vzorky navyše, keďže kombinácia ich parametrov by mohla viesť ku kvalitnému výsledku. Ide o vzorku č. 17 a vzorku č. 18. V prípade vzorky č. 1, boli hodnoty upravené tak, aby sa zhodovali s továrenským nastavením t.

Tab. 3.5 Zvolené hodnoty rezných parametrov pre t = 2 mm (N₂) veľká kontúra

Úroveň parametru	Rezná rýchlosť P1 [$m \cdot min^{-1}$]	Výkon laseru P2 [W]	Tlak plynu P3 [bar]	Poloha ohniska P4 [mm]
1	11,5	3000	15	-1
2	12	3300	15,5	-1,5
3	12,5	3600	16	-0,5
4	11	2700	14,5	-1,2

Tab. 3.6 N₂; veľká kontúra; t = 2 mm

Číslo vzorky	Rezná rýchlosť P1 [$m \cdot min^{-1}$]	Výkon laseru P2 [W]	Tlak plynu P3 [bar]	Poloha ohniska P4 [mm]
1	11,5	3000	16	-1,4
2	11,5	3300	15,5	-1,5
3	11,5	3600	16	-0,5
4	11,5	2700	14,5	-1,2
5	12	3000	15,5	-0,5
6	12	3300	15	-1,2
7	12	3600	14,5	-1
8	12	2700	16	-1,5
9	12,5	3000	16	-1,2
10	12,5	3300	14,5	-0,5
11	12,5	3600	15	-1,5
12	12,5	2700	15,5	-1
13	11	3000	14,5	-1,5
14	11	3300	16	-1
15	11	3600	15,5	-1,2
16	11	2700	15	-0,5
17	11,5	3000	15,5	-1,2
18	11,5	3300	16	-1,4

z. nastavenie pre bežné použitie v danej výrobe. Tieto odlišnosti žiadnym spôsobom nenarušujú optimalizáciu ortogonálnej sústavy Taguchi metódy, nakoľko ide len o malú zmenu, za účelom zlepšenia kvality. Vzorky 2 – 16 sa riadili zvolenými hodnotami určenými v tabuľke.

Následne bolo vykonané rezanie na plechu hrúbky 3 mm. Predvolená medzera rezu nebola menená a jej hodnota bola 0,2 mm a zvolená tryska mala taktiež priemer 2,3 mm. Tab. 3.7 uvádza zvolené kontrolné parametre.

Prvá úroveň parametrov opäť predstavuje odporúčané nastavenie pre danú hrúbku a druh materiálu výrobcom laseru. Ďalšie úrovne boli potom posunuté o určitú hodnotu na základe skúseností, rozsahu a možností laseru tak, aby mohlo ich prípadnou zmenou dôjsť k urýchleniu procesu, príp. k zlepšeniu výslednej kvality rezu. Rozloženie týchto parametrov do Taguchiho tabuľky L16 je uvedené v prílohe 4.

V tomto prípade boli všetky vzorky rezané len na základe kombinácie kontrolných parametrov bez rezania vzoriek navyše, keďže všetky parametre odpovedali hodnotám používaným v praxi. Vzorka č. 5 zodpovedá továrenskému nastaveniu laseru.

Tab. 3.7 Zvolené hodnoty rezných parametrov pre $t = 3$ mm (N_2) veľká kontúra

Úroveň param.	Rezná rýchlosť P1 [$m.min^{-1}$]	Výkon laseru P2 [W]	Tlak plynu P3 [bar]	Poloha ohniska P4 [mm]
1	7,6	3000	16	-2
2	8	3300	16,5	-1,5
3	8,4	3600	17	-1
4	7,2	2700	15,5	-2,5

3.2.2 Voľba parametrov pre rezanie kyslíkom

Pri rezaní kyslíkom sa používajú menšie rýchlosti ako v prípade rezania dusíkom. Tak ako pri rezaní dusíkom, najskôr boli vyrezané vzorky hrúbky 2 mm. Hodnota medzery rezu bola opäť predvolená a jej hodnota bola 0,16 mm. Zvolená tryska mala priemer 1,2 mm. Tab. 3.8 uvádza zvolené hodnoty kontrolných parametrov.

Tab. 3.8 Zvolené hodnoty rezných parametrov pre $t = 2$ mm (O_2) veľká kontúra

Úroveň param.	Rezná rýchlosť P1 [$m.min^{-1}$]	Výkon laseru P2 [W]	Tlak plynu P3 [bar]	Poloha ohniska P4 [mm]
1	5,5	1000	2,5	+0,5
2	5,9	1300	3	0
3	6,3	1600	3,5	-0,5
4	5,1	900	2	1

V prvom riadku sú tradične základné hodnoty dané výrobcom stroja pre daný materiál a jeho hrúbku. Rozloženie týchto parametrov do Taguchiho tabuľky L16 je uvedené v prílohe 4.

Následne sa vykonalo, rovnako ako pri dusíku, rezanie materiálu hrúbky 3 mm. Zvolené hodnoty kontrolných parametrov sú uvedené v tab. 3.9.

Tab. 3.9 Zvolené hodnoty rezných parametrov pre $t = 3$ mm (O_2) veľká kontúra

Úroveň param.	Rezná rýchlosť P1 [$m.min^{-1}$]	Výkon laseru P2 [W]	Tlak plynu P3 [bar]	Poloha ohniska P4 [mm]
1	4,3	1000	4,5	-0,5
2	4,7	1300	5	0
3	5,1	1600	5,5	+0,5
4	3,9	900	4	1

Ich rozloženie Taguchi metódou je znázornené v prílohe 4. V tomto prípade bola navyše rezaná vzorka č. 17, ktorá predstavuje továrenské nastavenie stroja.

3.2.3 Voľba parametrov pre rezanie stlačeným vzduchom

Ako už bolo spomenuté, tento experiment bol vytvorený na základe dohovoru s firmou pre porovnanie kvality rezu po rezaní dusíkom, či kyslíkom práve s kvalitou rezných hrán rezaných stlačeným vzduchom. Na základe možností daného laseru a potrieb výroby boli vzorky rezané z plechu hrúbky 2 mm. Hodnota medzery rezu bola predvolená a jej hodnota bola 0,17 mm.

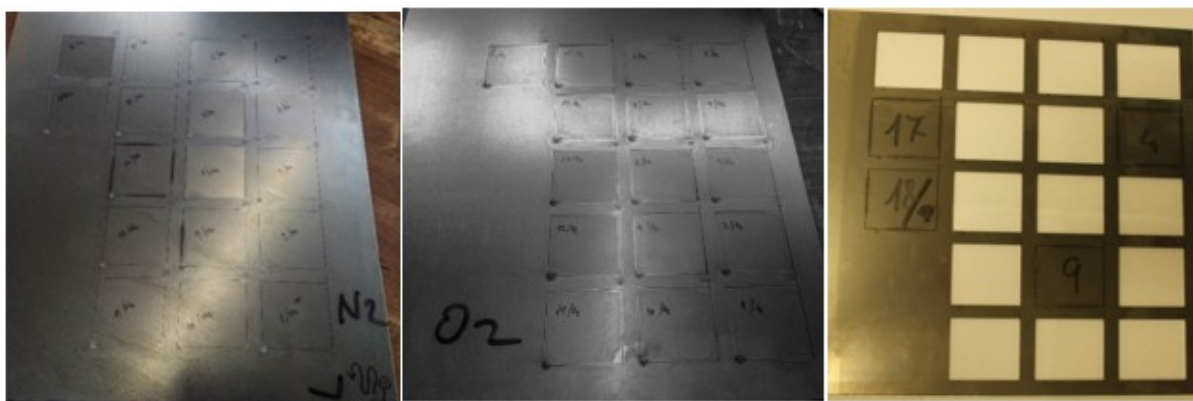
Zvolená tryska mala priemer 2,3 mm. Tab. 3.10 uvádza zvolené hodnoty kontrolných parametrov. Rozloženie parametrov podľa Taguchiho metódy je v prílohe 4.

Tab. 3.10 Zvolené hodnoty rezných parametrov pre $t = 2$ mm (stlačený vzduch) veľká kontúra

Úroveň param.	Rezná rýchlosť P1 [$m \cdot min^{-1}$]	Výkon laseru P2 [W]	Tlak plynu P3 [bar]	Poloha ohniska P4 [mm]
1	12,5	3000	5	-1
2	12,9	3300	5,5	-1,5
3	13,4	3600	6	-2
4	12,1	2700	4,5	-2,5

3.3 Vyhodnotenie experimentu

Na základe pripravených tabuliek a ich dodatočného spracovania pri realizácii experimentu boli vyrezané vzorky na tabuliach plechu z rovnakého materiálu v hrúbkach 2 mm a 3 mm ako popisuje predchádzajúca kapitola, viď obr. 41.



Obr. 41: Vyrezané vzorky na tabuli plechu

3.4 Meranie drsnosti vzoriek

Pri vyhodnocovaní vzoriek sa pred samotným meraním drsnosti testovalo vypadnutie vzoriek z tabule plechu. V prípade tabúl rezaných dusíkom vypadli všetky vzorky bez použitia väčšej sily, a to v prípade hrúbky plechu 2 mm aj 3 mm. Možno teda konštatovať, že vo variácii parametrov pre dusík nenastala žiadna varianta, pri ktorej by nedošlo k úplnému pre-rezaniu celej hrúbky plechu. V prípade použitia kyslíku nebolo možné bez použitia väčšej sily vylomiť vzorky č. 7, 10, 11 v prípade hrúbky plechu 2 mm a v prípade hrúbky plechu 3 mm nebolo možné vylomiť vzorky č. 7 a č. 11.

Meranie drsnosti je nevyhnutná operácia pre posúdenie kvality rezu. Meranie bolo realizované na Ústave prístrojovej



Obr. 42: Meracia jednotka v prevádzke

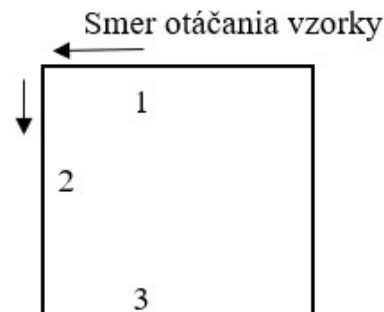
techniky AV ČR. Pre tento účel bol použitý digitálny drsnomer značky MarSurf M 300, viď obr. 42. Ide o prenosný, výkonný drsnomer s bezdrôtovým prenosom nameraných dát z meracej (typ RD 18) do vyhodnocovacej jednotky pomocou Bluetooth. Najdôležitejšie parametre prístroja sú uvedené v tab. 3.11.

Pre meranie je najskôr nutné upevniť vzorku do zveráku pre obmedzenie pohybu a následne priblížiť diamantový hrot meracej jednotky na materiál s dostatočnou vôľou, aby nedošlo k jeho poškodeniu. Taktiež pri otáčaní vzoriek vo zveráku a ich manipulácii je nutné dávať pozor, aby sa hrot neodlomil. Na vyhodnocovacej jednotke sa nastaví, ktoré veličiny chceme vyhodnotiť a v akom rozsahu. V tomto prípade bolo nastavené meranie strednej aritmetickej odchýlky profilu R_a a výška nerovnosti profilu R_{z5} . Číslo 5 značí, že meranie profilu prebieha v piatich po sebe idúcich úsekoch dĺžky 0,25 mm, takže celková dĺžka pojazdu hrotu meracieho zariadenia je 1,75 mm.

Tab. 3.11 Technické údaje drsnomeru MarSurf M300 [60]

Princíp merania	Dotyková metóda
Rozsah merania	350 μm
Celková dráha podľa ISO/JIS	1,25 mm, 4 mm, 12,5 mm
Počet jednotlivých dĺžok podľa ISO/JIS	Voliteľné 1 – 5
Rýchlosť snímania	0,5 mm.s^{-1}
Rozlíšenie profilu	8 nm
Rozsah teplôt pri prevádzke	+5 až +40 °C
Rozmery meracej jednotky (d x š x v)	130 mm x 70 mm x 50 mm
Rozmery vyhodnocovacej jednotky (d x š x v)	190 mm x 140 mm x 75 mm
Hmotnosť meracej jednotky	300 g
Hmotnosť vyhodnocovacej jednotky	1kg

Norma ISO 9013 stanovuje miesto merania na 1/3 od hornej hrany rezu, avšak nakoľko ide o veľmi tenké materiály bola drsnosť meraná v polovici od hornej hrany rezu. Namerané hodnoty sa automaticky zobrazia na displeji. Každá vzorka bola meraná na troch stranách v smere otáčania naznačenom na obr. 43. Čísla 1, 2, 3 naznačujú poradie merania jednotlivých hrán vzorky. Po odmeraní drsnosti na hrane 1 bola vzorka vo zveráku pootočená o 90° pre meranie strany č. 2 a rovnako pri meraní hrany č. 3. Poradie meraní je zhodné s číslovaním vzoriek.



Obr. 43: Smer otáčania vzorky

3.4.1 Hodnoty drsnosti pri rezaní dusíkom

V tab. 3.12 sú uvedené namerané hodnoty drsnosti pre vzorky rezané dusíkom, hrúbky 2 mm. V tomto prípade nie je nutný popis väd rezu, nakoľko v tejto sérii žiadne vady nevznikli. Mierne ostrejšie hrany mala len vzorka č. 6. Taktiež bola vypočítaná smerodajná odchýlka a priemerná hodnota drsnosti.

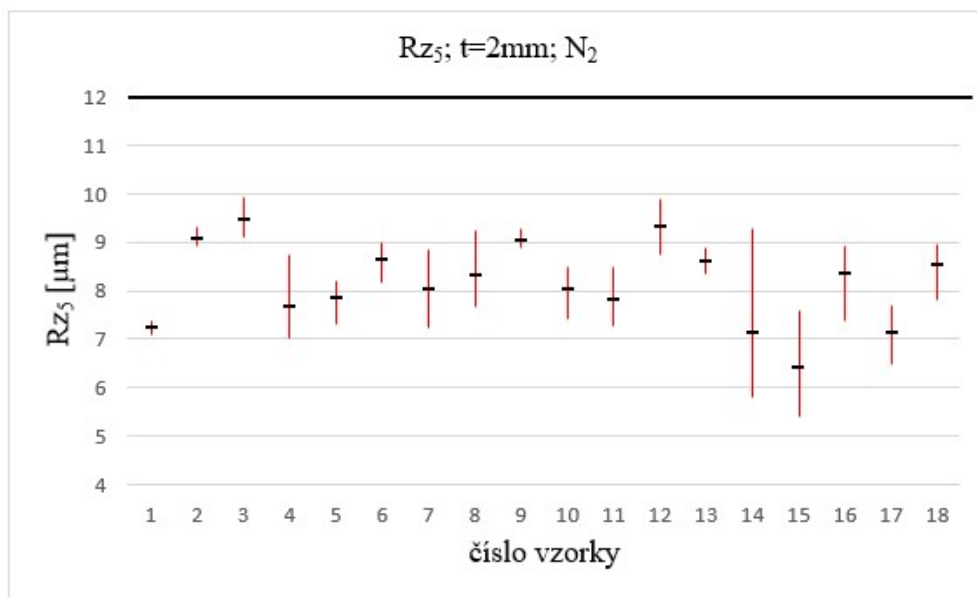
Na základe normy ISO 9013 boli vzorky zaradené do príslušajúcej triedy presnosti. Všetky uvedené vzorky prislúchajú do prvej triedy akosti, danej normou ISO 9013 s veľkou rezervou.

Na obr. 45 je znázornený graf pozostávajúci z jednotlivých vzoriek, ktorých číslovanie korešponduje s meraním a hodnota strednej aritmetickej odchýlky pre dané meranie ako aj jej

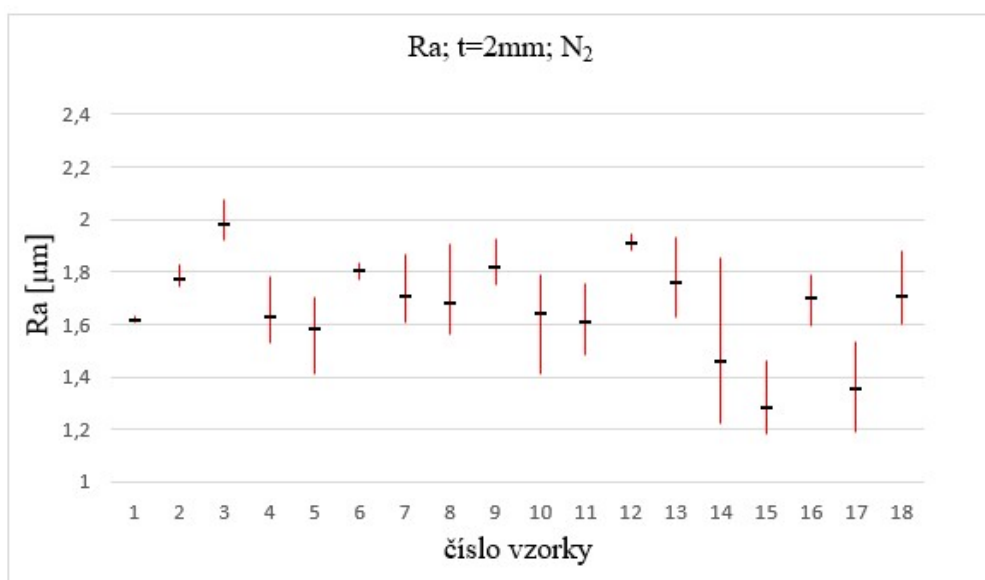
Tab. 3.12 Dusík N_2 ; $t = 2$ mm

Číslo vzorky	Parameter drsnosti	Hrana 1 [μm]	Hrana 2 [μm]	Hrana 3 [μm]	Priemerná drsnosť [μm]	Smerodajná odchýlka [μm]
1	Ra	1,632	1,603	1,615	1,617	0,012
	Rz ₅	7,084	7,384	7,343	7,27	0,133
2	Ra	1,752	1,74	1,83	1,775	0,039
	Rz ₅	8,926	9,329	9,053	9,103	0,168
3	Ra	2,073	1,96	1,92	1,985	0,064
	Rz ₅	9,483	9,928	9,084	9,498	0,345
4	Ra	1,583	1,78	1,53	1,632	0,109
	Rz ₅	7,018	8,726	7,306	7,683	0,747
5	Ra	1,635	1,71	1,41	1,584	0,125
	Rz ₅	8,203	8,108	7,313	7,875	0,399
6	Ra	1,824	1,83	1,77	1,809	0,028
	Rz ₅	8,822	8,181	8,996	8,666	0,350
7	Ra	1,87	1,6	1,65	1,708	0,116
	Rz ₅	8,853	8,107	7,234	8,065	0,662
8	Ra	1,574	1,91	1,56	1,681	0,161
	Rz ₅	7,672	9,258	8,126	8,352	0,667
9	Ra	1,929	1,75	1,79	1,823	0,077
	Rz ₅	8,974	8,892	9,284	9,05	0,169
10	Ra	1,407	1,79	1,74	1,644	0,169
	Rz ₅	7,423	8,289	8,472	8,061	0,458
11	Ra	1,754	1,48	1,6	1,612	0,111
	Rz ₅	8,502	7,279	7,718	7,833	0,506
12	Ra	1,883	1,9	1,95	1,910	0,026
	Rz ₅	9,423	8,737	9,889	9,349	0,473
13	Ra	1,728	1,94	1,63	1,764	0,128
	Rz ₅	8,67	8,886	8,334	8,63	0,227
14	Ra	1,313	1,86	1,22	1,464	0,279
	Rz ₅	5,784	9,268	6,383	7,145	1,521
15	Ra	1,462	1,18	1,22	1,287	0,124
	Rz ₅	7,581	6,341	5,402	6,441	0,892
16	Ra	1,789	1,59	1,73	1,702	0,083
	Rz ₅	8,914	7,387	8,816	8,372	0,698
17	Ra	1,534	1,36	1,19	1,359	0,142
	Rz ₅	7,288	7,711	6,476	7,158	0,512
18	Ra	1,882	1,6	1,65	1,709	0,124
	Rz ₅	8,972	7,814	8,9	8,562	0,529

minimálna a maximálna hodnota. Z grafu možno určiť, že najlepšie z hľadiska drsnosti povrchu obstála vzorka č. 15, ktorá má najmenšiu hodnotu Ra. Ďalšou v poradí by bola vzorka č. 17. Vzorka č. 1, ktorá je predstaviteľom továrenského nastavenia laseru má vyššiu hodnotu Ra, no zo všetkých vzoriek najmenší rozptyl.



Obr. 44: Zaradenie vzoriek do triedy presnosti; N_2 ; $t = 2$ mm



Obr. 45: Graf drsnosti Ra vzoriek; N_2 ; $t = 2$ mm

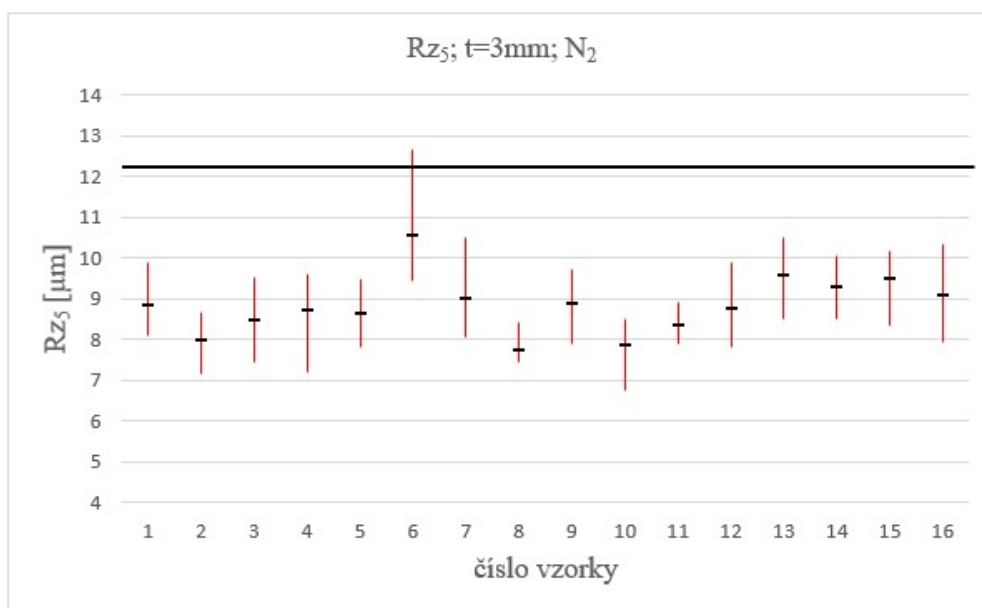
V tab. 3.13 sú namerané hodnoty drsnosti pri rezaní plechu hrúbky 3 mm dusíkom. Táto sada obsahovala niekoľko vzoriek, ktoré mali určitú vadu, no všetky boli minimálne, a preto ich nie je nutné zvažovať vo výsledku. V tabuľke sú taktiež uvedené hodnoty priemernej drsnosti a smerodajná odchýlka.

Vzorky boli zaradené do triedy presnosti na základe normy ISO 9013 (obr. 46), a opäť všetky vyhovujú triede presnosti 1 s určitou rezervou až na vzorku č. 6, ktorá prekračuje hranicu prvej triedy akosti kvôli jej väčšiemu rozptylu. Táto vzorka teda nespadá do prvej triedy akosti absolútne. Na obr. 47 sú vzorky zobrazené s ich prislúchajúcou hodnotou parametru Ra. Z grafu je možno stanoviť, že z hľadiska drsnosti najlepšie dopadla vzorka č. 10, ďalej vzorka č. 8. Najmenší rozptyl zaznamenávame u vzorky č. 12, kde je však hodnota drsnosti o niečo vyššia, no stále v

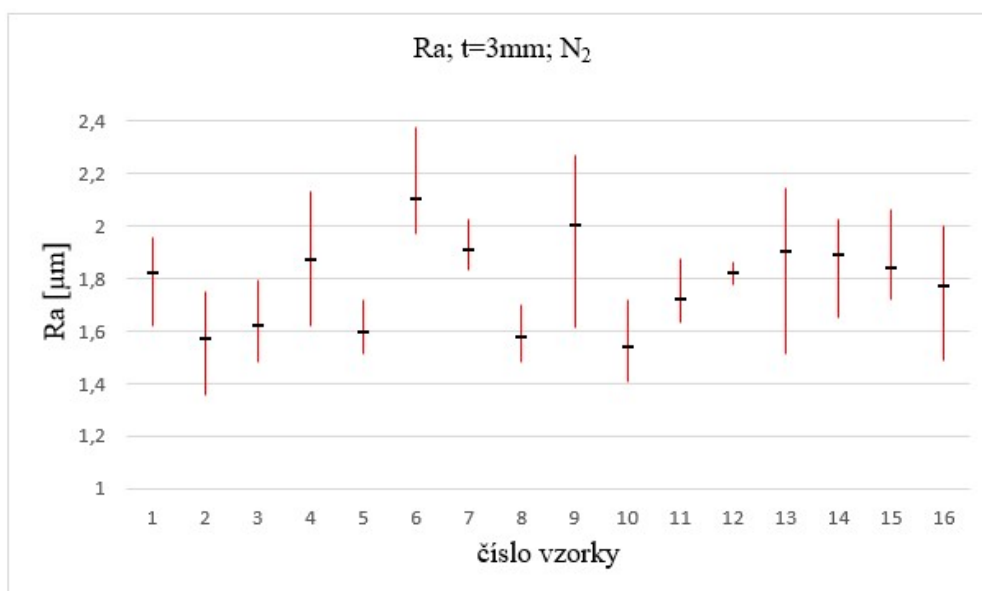
Tab. 3.13 Dusík N₂; t = 3 mm

Číslo vzorky	Parametre drsnosti	Hrana 1 [μm]	Hrana 2 [μm]	Hrana 3 [μm]	Prie-merná drsnosť [μm]	Smero-dajná odchýlka [μm]	Vady rezu
1	Ra	1,954	1,895	1,618	1,822	0,146	
	Rz ₅	9,865	8,69	8,067	8,874	0,745	
2	Ra	1,753	1,61	1,36	1,573	0,165	Občasné otrepy do 0,5 mm
	Rz ₅	8,131	8,676	7,154	7,987	0,63	
3	Ra	1,795	1,48	1,6	1,627	0,129	
	Rz ₅	8,516	7,438	9,534	8,496	0,856	
4	Ra	1,877	2,14	1,62	1,876	0,212	Občasné otrepy do 0,5 mm
	Rz ₅	9,486	9,593	7,191	8,757	1,108	
5	Ra	1,566	1,72	1,51	1,6	0,089	
	Rz ₅	8,615	9,482	7,82	8,639	0,679	
6	Ra	1,971	2,38	1,97	2,105	0,191	
	Rz ₅	9,446	12,65	9,597	10,56	1,476	
7	Ra	1,878	2,03	1,83	1,913	0,083	
	Rz ₅	8,046	10,51	8,566	9,041	1,06	
8	Ra	1,483	1,7	1,55	1,578	0,089	Občasné otrepy do 0,5 mm
	Rz ₅	8,415	7,42	7,422	7,752	0,469	
9	Ra	2,137	2,27	1,61	2,007	0,283	Občasné otrepy do 0,5 mm
	Rz ₅	9,124	9,721	7,898	8,914	0,759	
10	Ra	1,498	1,72	1,41	1,542	0,131	
	Rz ₅	8,496	8,44	6,725	7,887	0,822	
11	Ra	1,633	1,88	1,67	1,727	0,107	
	Rz ₅	7,891	8,903	8,378	8,391	0,413	
12	Ra	1,829	1,87	1,77	1,823	0,038	Otrepy
	Rz ₅	8,721	9,868	7,781	8,79	0,853	
13	Ra	2,062	2,15	1,51	1,907	0,282	
	Rz ₅	9,857	10,49	8,48	9,609	0,839	
14	Ra	1,651	2,03	2	1,892	0,171	
	Rz ₅	8,496	9,341	10,06	9,299	0,639	
15	Ra	1,718	2,06	1,74	1,841	0,157	
	Rz ₅	8,317	10,16	10,1	9,526	0,855	
16	Ra	1,832	2	1,49	1,774	0,213	
	Rz ₅	10,32	9,108	7,914	9,114	0,982	

prvej triede akosti. Táto vzorka však oproti ostatným má z vizuálneho hľadiska horšiu kvalitu. Hrany obsahujú otrepy, resp. priepaly, ktorých príčinou môže byť vyššia rezná rýchlosť a malý výkon, ktorý bol v tomto prípade použitý.



Obr. 46: Zaradenie vzoriek do triedy presnosti; N₂; t = 3 mm



Obr. 47: Hodnoty drsnosti Ra; dusík; 3 mm

3.4.2 Hodnoty drsnosti pri rezaní kyslíkom

V tab. 3.14 sú uvedené namerané hodnoty drsnosti pre vzorky z plechu rezané kyslíkom, hrúbky 2 mm. V tomto prípade nebolo možné vybratie všetkých vzoriek z dôvodu nevhodnej kombinácie parametrov. Ide o vzorky č. 7, 10 a 11. Tieto vzorky sa ďalej vo vyhodnotení neberú do úvahy, nakoľko nevyhoveli prvej podmienke vypadnutia z tabule plechu. Na vzorkách, ktoré vyhoveli tejto podmienke bola následne spočítaná smerodajná odchýlka a priemerná hodnota drsnosti.

Vzorky rezané kyslíkom všeobecne vykazujú lepšie hodnoty parametru drsnosti Ra ako je tomu napríklad pri vzorkách rezaných dusíkom. Vykazujú však viac vzniknutých väd, ako sú otrepy, príp. okuje t. z. oxidická vrstva. Tá sa vyznačuje mierne čiernou farbou. Všetky vzorky

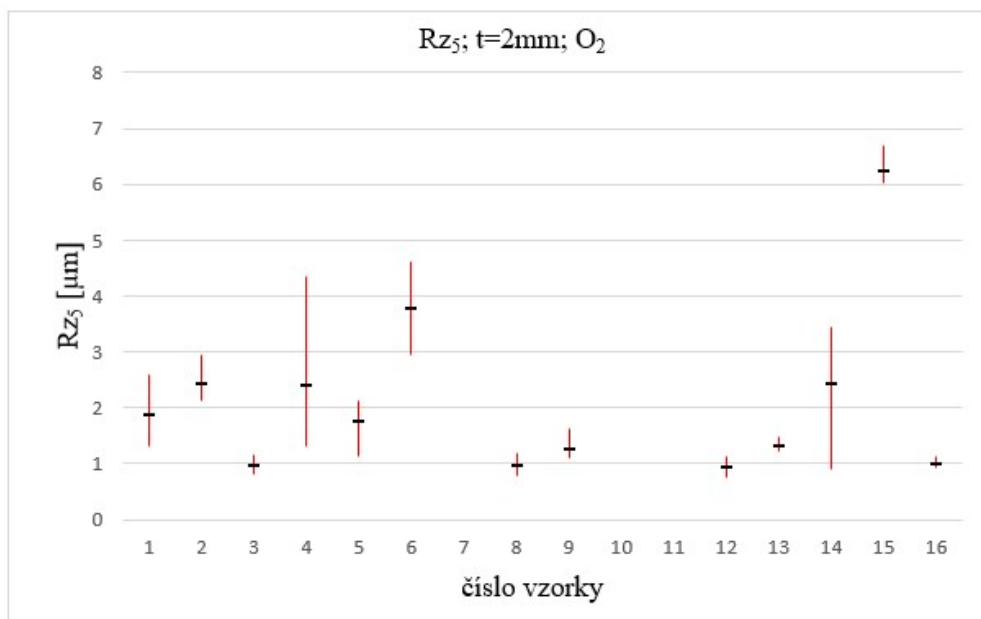
Tab. 3.14 Kyslík O₂; t = 2 mm

Číslo vzorky	Parametre drsnosti	Hrana 1 [μm]	Hrana 2 [μm]	Hrana 3 [μm]	Priemerná drsnosť [μm]	Smerodajná odchýlka [μm]	Vady rezu
1	Ra	0,315	0,323	0,257	0,298	0,029	
	Rz5	1,759	2,581	1,294	1,878	0,532	
2	Ra	0,377	0,285	0,408	0,357	0,052	Otrepy
	Rz5	2,278	2,958	2,14	2,459	0,358	
3	Ra	0,240	0,144	0,177	0,187	0,04	
	Rz5	1,157	0,808	0,945	0,97	0,144	
4	Ra	0,292	0,634	0,246	0,391	0,173	
	Rz5	1,577	4,349	1,299	2,408	1,379	
5	Ra	0,4	0,231	0,502	0,378	0,112	Okuje, otrepy
	Rz5	2,117	1,126	2,092	1,778	0,461	
6	Ra	0,614	0,832	0,541	0,662	0,124	Okuje, otrepy
	Rz5	3,807	4,612	2,943	3,787	0,682	
8	Ra	0,192	0,235	0,144	0,190	0,037	
	Rz5	0,996	1,198	0,773	0,989	0,174	
9	Ra	0,188	0,3	0,174	0,221	0,056	
	Rz5	1,141	1,632	1,091	1,288	0,244	
12	Ra	0,238	0,212	0,133	0,194	0,045	
	Rz5	1,122	1,013	0,750	0,962	0,156	
13	Ra	0,218	0,226	0,272	0,239	0,024	
	Rz5	1,216	1,305	1,488	1,336	0,113	
14	Ra	0,564	0,545	0,134	0,414	0,198	
	Rz5	3,45	3,03	0,9	2,46	1,116	
15	Ra	1,104	1,09	1,303	1,166	0,097	
	Rz5	6,095	6,013	6,692	6,267	0,303	
16	Ra	0,181	0,17	0,258	0,203	0,039	
	Rz5	1,024	0,914	1,124	1,021	0,086	

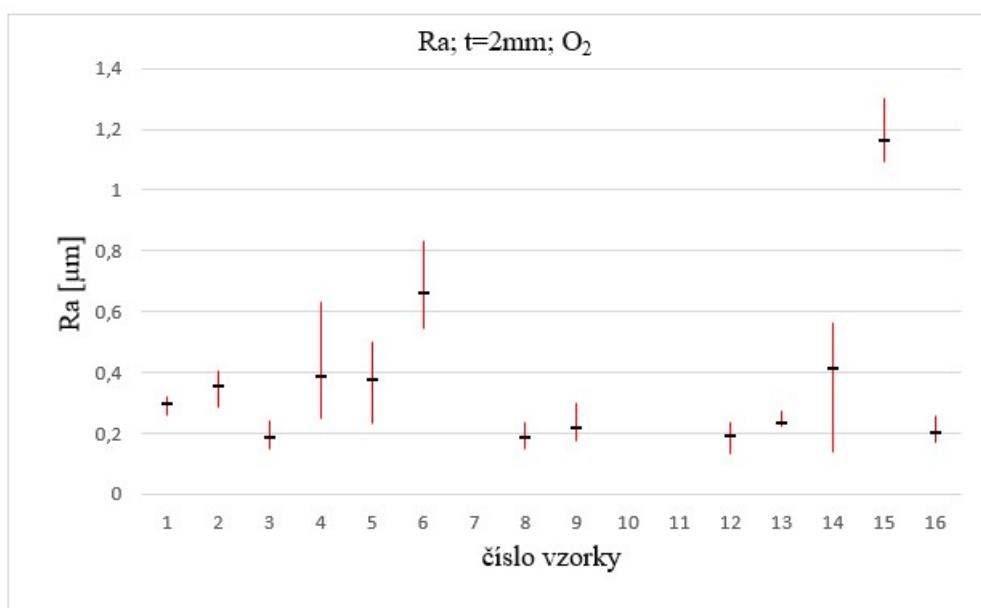
boli opäť zaradené podľa normy ISO 9013 do prvej triedy presnosti s veľkou rezervou, viď obr. 48. Na obr. 49 je znázornený graf parametru drsnosti Ra pre túto sadu vzoriek. Z tohto hľadiska sa osvedčila voľba viacerých variant parametrov. Najlepšiu hodnotu vykazuje vzorka č. 3. Veľmi dobré výsledky vykazujú aj vzorky č. 8, 9, 12 a tiež vzorka č. 16. Na vzorke č. 3 boli zaznamenané mierne ostrejšie hrany. Ostatné spomínané vzorky sú bez väd.

Veľký rozptyl hodnôt je viditeľný pri vzorke č. 4 a 14. Najhoršie hodnoty drsnosti má vzorka č. 15, ktorá v porovnaní s ostatnými dosahuje drsnosť vyššiu až o 1 μm . Celkovo možno pri tejto sade vzoriek konštatovať, že daná voľba parametrov umožňuje posúdiť niekoľko možných kombinácií s veľmi dobrou výslednou kvalitou rezu.

Ďalšia sada vzoriek bola vyrezaná kyslíkom z plechu hrúbky 3mm, rovnako ako pri rezaní dusíkom. V tab. 3.15 sú uvedené hodnoty nameranej drsnosti. V tabuľke sú taktiež uvedené hodnoty priemernej drsnosti a smerodajná odchýlka. Ani v tejto sade sa nepodarilo vybrať všetky vzorky. Konkrétne nebolo možné vybrať vzorky č. 7 a 11.



Obr. 48: Zaradenie vzoriek do triedy presnosti; O₂; 2 mm



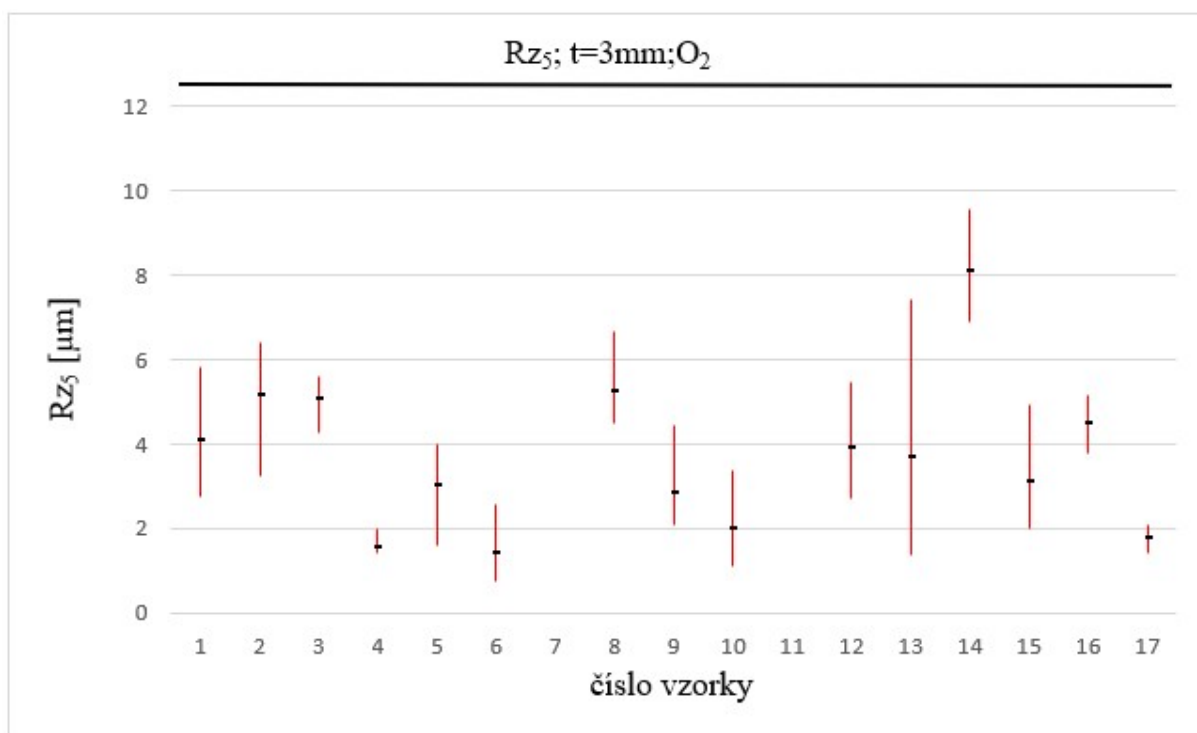
Obr. 49: Hodnoty drsnosti; O₂; 2 mm

Pri rezaní tejto sady vzoriek boli vo viacerých vzorkách zaznamenané štandardné vady vznikajúce pri rezaní kyslíkom. Objavovali sa okuje, otrepy najmä na spodnej strane vzorky a taktiež ryhy, resp. široký rez. Všetky vzorky boli opäť s veľkou rezervou zaradené do prvej triedy presnosti, viď obr. 50. Z hľadiska drsnosti reznej hrany (obr. 51) sa najlepšie umiestnila vzorka č. 4, vzorka č. 6 a ďalej vzorka č. 17, ktorá zároveň zodpovedá továrenskému nastaveniu stroja firmou Trumpf.

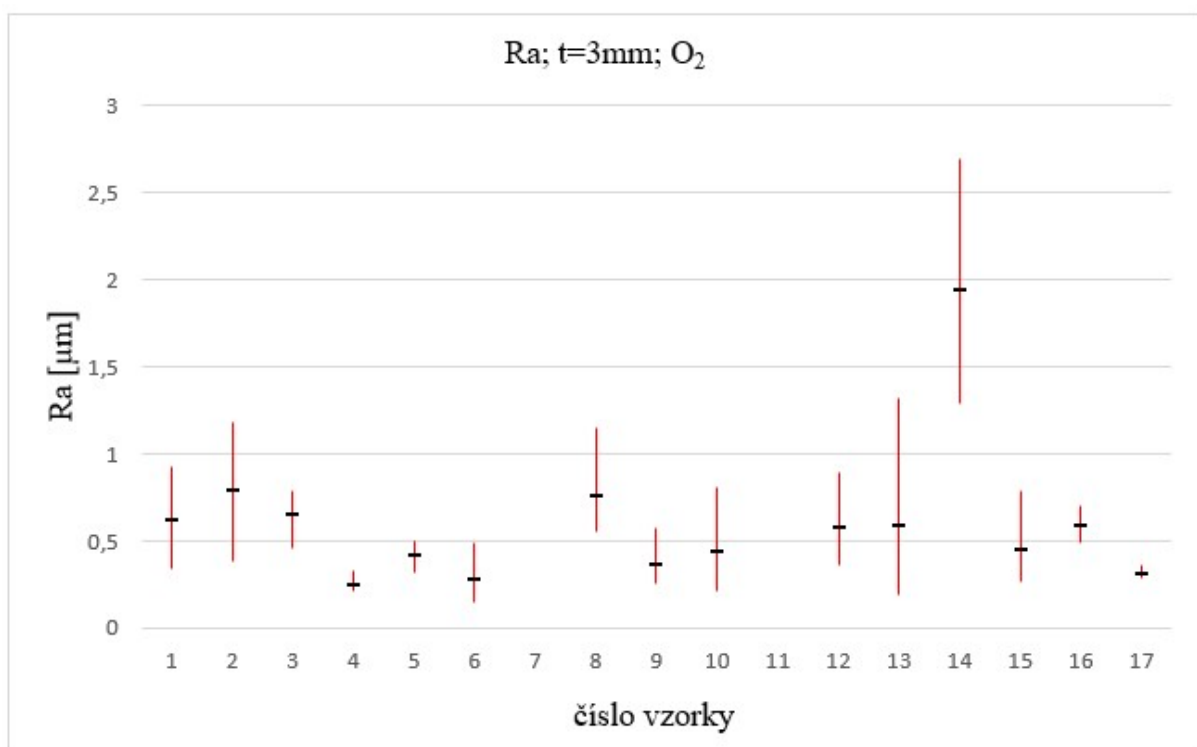
Ostatné vzorky vykazujú veľké rozptyly hodnôt drsnosti. Najhoršiu hodnotu drsnosti má vzorka č. 14, ktorá je výrazne odskočená od ostatných hodnôt.

Tab. 3.15 Kyslík O₂; t = 3 mm

Číslo vzorky	Parametre drsnosti	Hrana 1 [μm]	Hrana 2 [μm]	Hrana 3 [μm]	Prie-merná drsnosť [μm]	Smero-dajná odchýlka [μm]	Vady rezu
1	Ra	0,337	0,612	0,928	0,626	0,241	
	Rz5	2,764	3,917	5,812	4,164	1,257	
2	Ra	1,183	0,383	0,838	0,801	0,328	
	Rz5	6,404	3,259	6,086	5,244	1,41	
3	Ra	0,785	0,747	0,455	0,662	0,147	Okuje, široký rez
	Rz5	5,506	5,613	4,276	5,132	0,607	
4	Ra	0,228	0,329	0,214	0,257	0,051	
	Rz5	1,414	2,006	1,532	1,651	0,256	
5	Ra	0,453	0,32	0,501	0,425	0,077	
	Rz5	3,676	1,605	3,989	3,09	1,058	
6	Ra	0,149	0,493	0,209	0,284	0,150	
	Rz5	0,756	2,562	1,165	1,494	0,773	
8	Ra	1,154	0,586	0,55	0,763	0,277	
	Rz5	6,679	4,839	4,506	5,341	0,956	
9	Ra	0,273	0,25	0,576	0,366	0,149	Otrepy
	Rz5	2,1	2,258	4,445	2,934	1,07	
10	Ra	0,209	0,806	0,328	0,448	0,258	Otrepy
	Rz5	1,112	3,383	1,741	2,079	0,957	
12	Ra	0,483	0,362	0,891	0,577	0,226	
	Rz5	3,768	2,682	5,476	3,975	1,15	
13	Ra	0,271	0,187	1,319	0,592	0,515	
	Rz5	2,595	1,368	7,405	3,789	2,605	
14	Ra	1,867	2,692	1,291	1,95	0,575	
	Rz5	8,058	9,572	6,889	8,173	1,098	
15	Ra	0,26	0,317	0,784	0,454	0,235	Okuje, ryha
	Rz5	1,979	2,741	4,913	3,211	1,243	
16	Ra	0,585	0,704	0,485	0,591	0,09	
	Rz5	4,751	5,147	3,757	4,552	0,585	
17	Ra	0,306	0,285	0,355	0,315	0,029	
	Rz5	2,04	1,397	2,084	1,84	0,314	



Obr. 50: Zaradenie vzoriek do triedy presnosti; O_2 ; 3 mm



Obr. 51: Hodnoty drsnosti; O_2 ; 3 mm

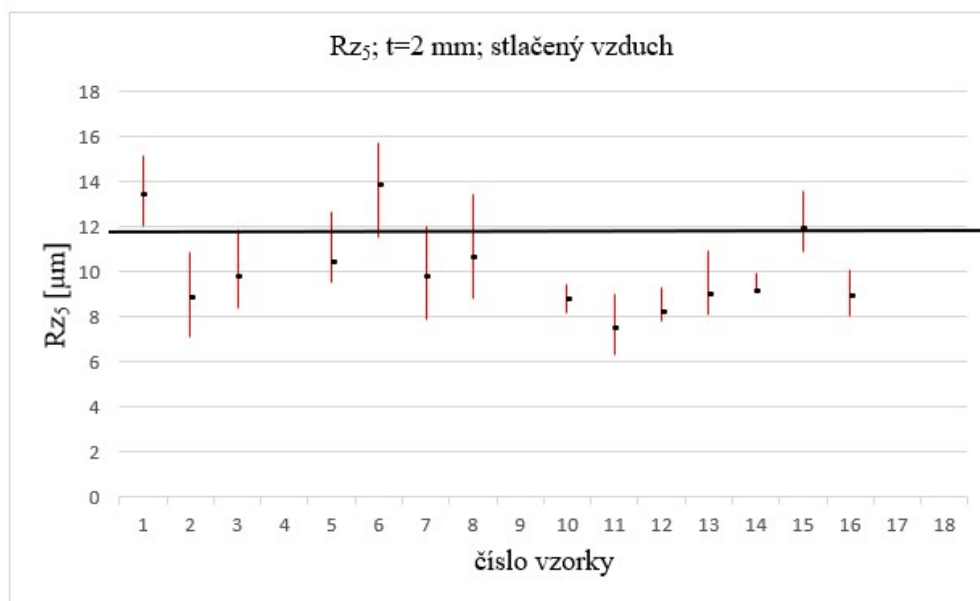
3.4.3 Hodnoty drsnosti pri rezaní stlačeným vzduchom

V tab. 3.16 sú uvedené hodnoty namerané hodnoty drsnosti pre vzorky z plechu rezané stlačeným vzduchom, hrúbky 2 mm. V tomto prípade opäť nebolo možné vybrať všetky vzorky. Ide o vzorky č. 4, 9, 17 a 18. Na vzorkách, ktoré vyhoveli tejto podmienke bola následne spočítaná smerodajná odchýlka a priemerná hodnota drsnosti. Vzorky nevykazovali žiadne vady.

Tab. 3.16 Stlačený vzduch; t = 2 mm

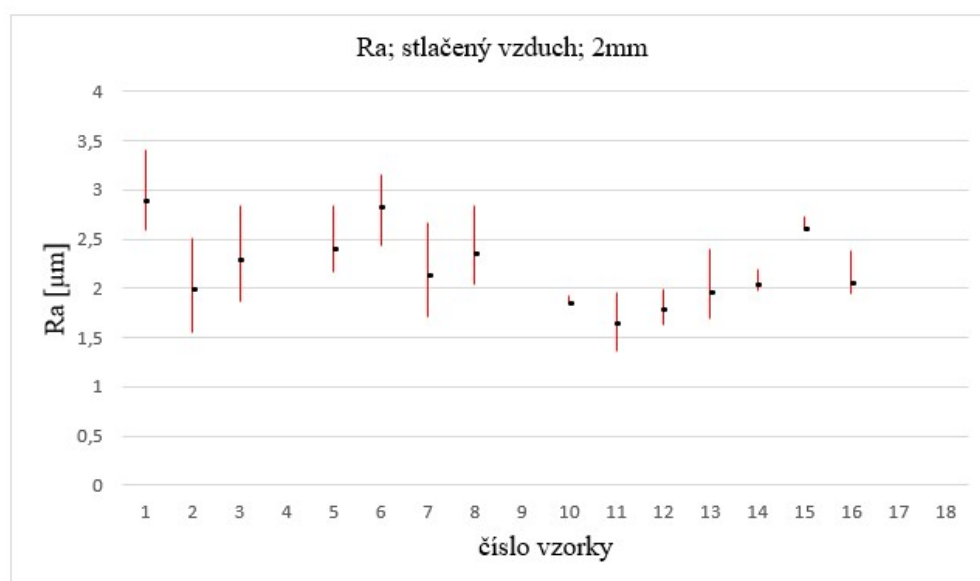
Číslo vzorky	Parametre drsnosti	Hrana 1 [μm]	Hrana 2 [μm]	Hrana 3 [μm]	Priemerná drsnosť [μm]	Smerodajná odchýlka [μm]
1	Ra	3,403	2,594	2,764	2,92	0,348
	Rz ₅	15,17	11,99	13,77	13,64	1,301
2	Ra	1,542	2,018	2,512	2,024	0,396
	Rz ₅	7,077	9,104	10,9	9,027	1,446
3	Ra	2,843	1,863	2,286	2,331	0,401
	Rz ₅	11,87	8,356	9,729	9,985	1,446
5	Ra	2,164	2,843	2,286	2,431	0,296
	Rz ₅	9,689	12,64	9,541	10,623	1,427
6	Ra	2,976	2,435	3,161	2,857	0,308
	Rz ₅	15,75	11,49	14,96	14,067	1,85
7	Ra	2,662	1,709	2,158	2,176	0,389
	Rz ₅	12,05	7,912	9,976	9,979	1,689
8	Ra	2,287	2,845	2,037	2,39	0,338
	Rz ₅	8,838	13,42	10,2	10,819	1,921
10	Ra	1,87	1,853	1,918	1,88	0,028
	Rz ₅	9,473	8,196	9,199	8,956	0,549
11	Ra	1,959	1,709	1,353	1,674	0,249
	Rz ₅	9,016	7,769	6,337	7,707	1,095
12	Ra	1,631	1,839	1,99	1,82	0,147
	Rz ₅	8,08	7,832	9,312	8,408	0,647
13	Ra	2,396	1,927	1,685	2,003	0,295
	Rz ₅	10,92	8,54	8,09	9,183	1,242
14	Ra	2,063	2,199	1,979	2,08	0,09
	Rz ₅	9,063	9,97	9,082	9,372	0,423
15	Ra	2,58	2,726	2,639	2,648	0,06
	Rz ₅	11,87	13,59	10,86	12,107	1,127
16	Ra	1,94	2,39	1,959	2,096	0,208
	Rz ₅	8,047	10,09	9,248	9,128	0,838

Na obr. 52 je znázornené zaradenie do triedy presnosti pre rezanie laserom. Do druhej triedy presnosti sú zaradené vzorky č. 1 a 6. Vzorka č. 15 leží so svojou hodnotou na hranici triedy 1 a 2. Vzorky č. 5, 8 majú svoju maximálnu hodnotu v druhej triede presnosti a teda ich nemožno zaradiť do prvej triedy presnosti absolútne. Z hľadiska drsnosti (obr.53) možno na prvé miesto zaradiť vzorku č. 11 a ďalej vzorku č. 12 a 10. Najmenší rozptyl hodnôt drsnosti vykazuje vzorka č. 10.



Obr. 52: Zaradenie vzoriek do triedy presnosti; vzduch; 2 mm

Rezanie stlačeným vzduchom bolo realizované len pre hrúbku plechu 2 mm. Meranie slúži najmä pre porovnanie kvality rezu s ostatnými dvoma spôsobmi laserového delenia, t. z. laserové rezanie dusíkom a kyslíkom.



Obr. 53: Hodnoty drsnosti; vzduch; 2 mm

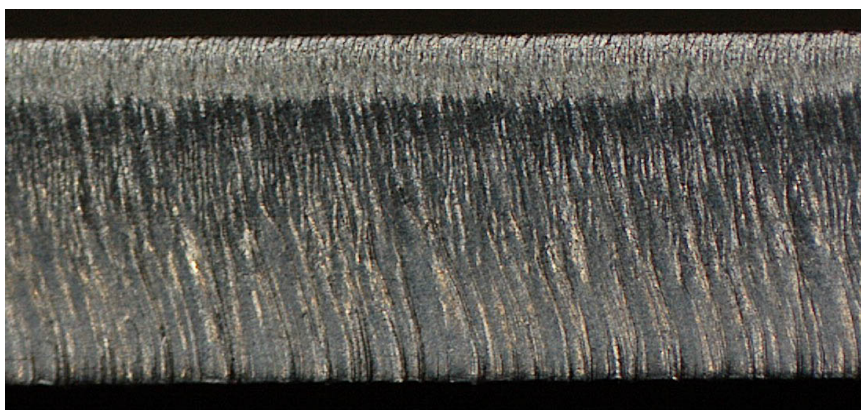
3.5 Štruktúra povrchu vybraných vzoriek

Vo výrobných procesoch sa kladie veľký dôraz najmä na produktivitu výroby. Z tohto dôvodu je nutné posudzovať vzorky okrem kvality rezu aj s ohľadom na reznú rýchlosť. Zvýšenie reznej rýchlosti pri zachovaní vhodnej kvality rezu môže viesť k značnej finančnej úspore procesu. S

ohľadom na tento fakt boli vybrané vzorky, ktoré spĺňajú súčasne obe podmienky. Pomocou stereomikroskopu Olympus SZ 61 určeného pre mikroskopické fotografovanie bola na vybraných vzorkách nasnímaná štruktúra reznej hrany. V prílohe 5 sú uvedené snímky niektorých vzniknutých väd vplyvom zlej voľby rezných parametrov.

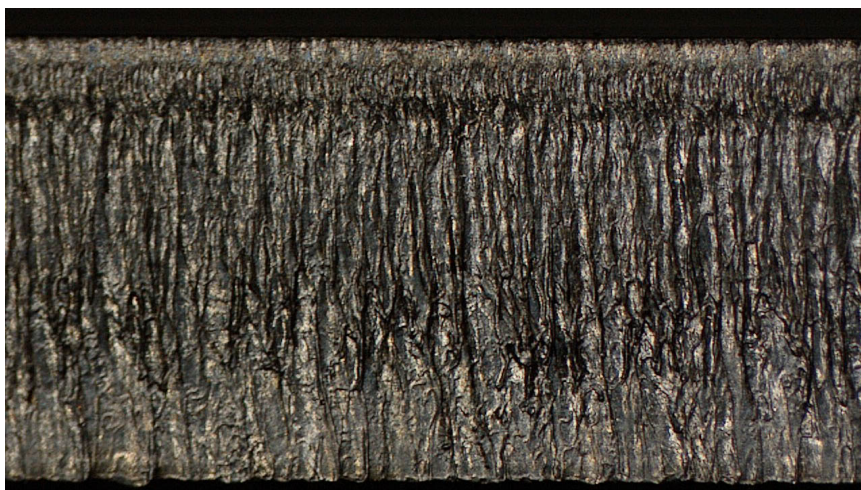
3.5.1 Výber vzoriek rezaných dusíkom

Pri rezaní vzoriek z plechu hrúbky 2 mm bola najnižšia hodnota drsnosti zaznamenaná pri vzorke č. 15. Jej hodnota je $1,287 \mu\text{m}$, použitá rezná rýchlosť má hodnotu 11 m.min^{-1} a povrch reznej hrany je bez väd. Vhodnejšie sa však ukázala voľba vzorky č. 1. Výsledná drsnosť povrchu tejto vzorky je $1,617 \mu\text{m}$ a rezná rýchlosť $11,5 \text{ m.min}^{-1}$. Táto vzorka zodpovedá továrenskému nastaveniu laseru a má najmenšie hodnoty rozptylu, resp. smerodajnej odchýlky. Na obr. 54 je znázornená mikroskopická fotografia štruktúry reznej hrany.



Obr. 54: Štruktúra reznej hrany; dusík; 2 mm

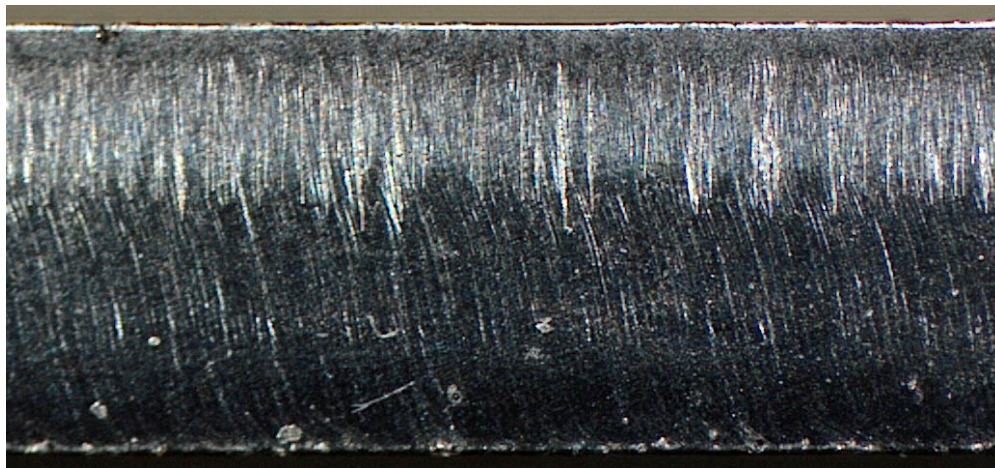
V sade vzoriek plechu hrúbky 3 mm je najlepšia hodnota drsnosti zaznamenaná u vzorky č. 10, ktorej hodnota je $1,542 \mu\text{m}$. Po posúdení produktivity bola táto vzorka vybraná aj ako vhodný zástupca danej sady. Jej štruktúra je znázornená na obr. 55.



Obr. 55: Štruktúra reznej hrany; dusík; 3 mm

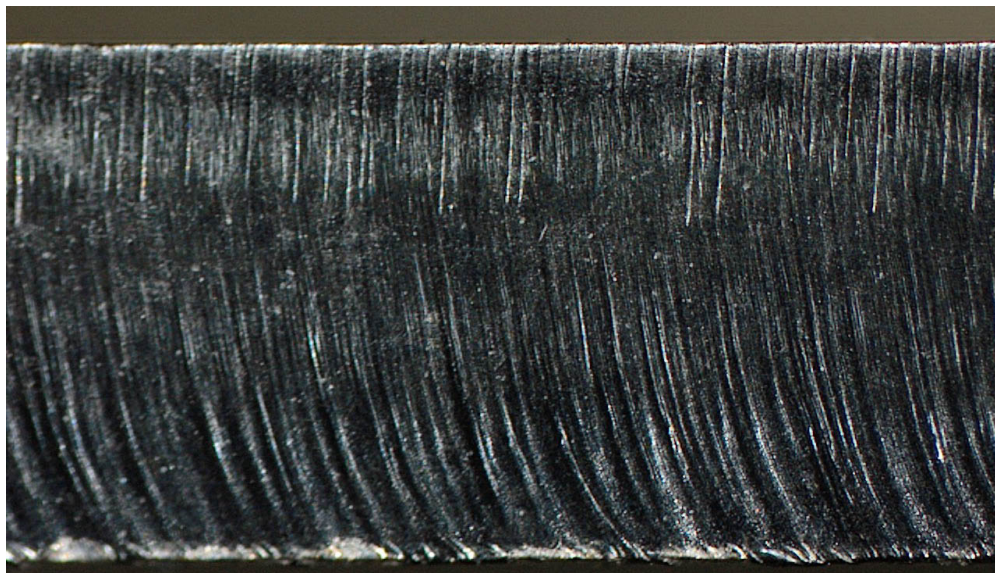
3.5.2 Posúdenie vzoriek rezaných kyslíkom

V tomto prípade je možno vyberať podľa konkrétnych potrieb z viacerých variant meraní. Pri plechu hrúbky 2 mm má najlepšiu hodnotu drsnosti vzorka č. 3, no s minimálnym rozdielom ďalej vzorky č. 8, 9, 12 a vzorka č. 16. Hodnoty ich drsností sú v rozmedzí 0,187- 0,22 μm . Po posúdení týchto možností bola vybraná vzorka č. 9. Obr. 56 znázorňuje jej výslednú štruktúru.



Obr. 56: Štruktúra reznej hrany; kyslík; 2 mm

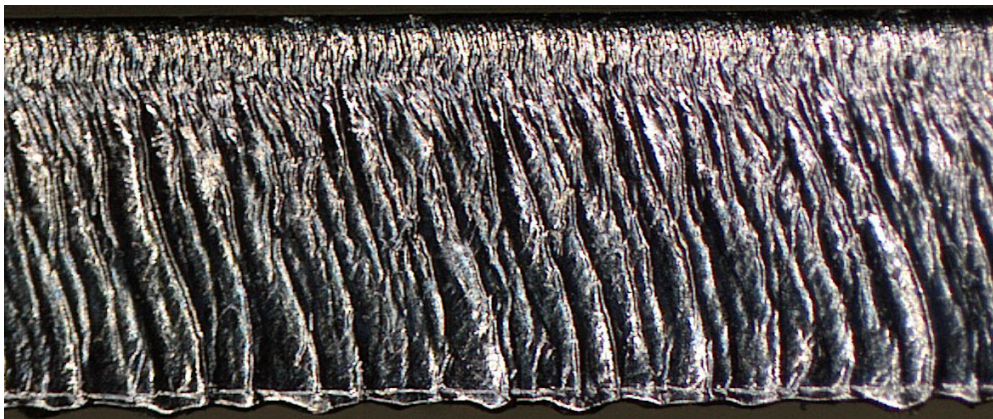
V prípade vzoriek hrúbky 3 mm, kde dochádzalo k častým vadám dopadla najlepšie vzorka č. 4 a hneď za ňou vzorka č. 6 a č. 17. Vzorka č. 17 zároveň odpovedá továrenskému nastaveniu laseru. Ako vhodný zástupca tejto sady bola vybraná vzorka č. 6. Na obr. 57 je znázornená štruktúra jej reznej hrany.



Obr. 57: Štruktúra reznej hrany; kyslík; 3 mm

3.5.3 Posúdenie vzoriek rezaných stlačeným vzduchom

V tomto prípade nemožno hodnotiť vzorku č. 1. Možno predpokladať, že pri zriadení stroja nedošlo k dostatočnému vyfúknutiu predchádzajúceho rezného plynu (dusík), a teda vzorka vykazuje odlišné vizuálne vlastnosti od ostatných vzoriek rezaných stlačeným vzduchom. Najlepší reprezentant tejto sady je vzorka č. 11. Z hľadiska posúdenia drsnosti je porovnateľná so vzorkami rezanými dusíkom. Oproti vzorkám rezanými dusíkom však vykazuje vyššie hodnoty parametru Rz5 a známky oxidickej vrstvy, ktorá obmedzuje možnosti použitia.



Obr. 58: Štruktúra reznej hrany; stlačený vzduch; 2 mm

4 TECHNICKO – EKONOMICKÉ ZHODNOTENIE

Pri vyhodnocovaní ekonomického hľadiska danej výroby sa vychádza z predpokladu známej hodinovej sadzby laserového centra. Táto suma v sebe zahŕňa nasledujúce položky:

- Odpisy /leasing,
- elektrická energia,
- médiá (plyny, stlačený vzduch),
- mzda operátora,
- nástroje,
- spotrebné diely,
- servis,
- údržba,
- réžia (prevádzka firmy, priestory),
- zisk,
- efektivita výroby.

Z týchto položiek patria medzi najväčšie odpisy a servisné služby. V prípade použitia dusíku sa predpokladá hodinová sadzba laserového centra 2500 Kč.hod^{-1} , v prípade použitia kyslíku 2000 Kč.hod^{-1} a v prípade stlačeného vzduchu je predpokladaná suma 1800 Kč.hod^{-1} . V tab. 4.1 sú zobrazené náklady na výrobu jednej vzorky a následne na výrobu 1000 ks vzoriek. Vychádza sa pritom z reznej rýchlosti rezania jednotlivých vzoriek a ich obvodu. Obvod všetkých vzoriek je 0,2 m.

Tab. 4.1 Technicko – ekonomické zhodnotenie

Vybrané vzorky	Dusík; 2mm Vzorka č. 1	Dusík; 3mm Vzorka č. 10	Kyslík; 2 mm Vzorka č. 9	Kyslík; 3 mm Vzorka č. 6	Stlačený vzduch Vzorka č. 10
Rezná rýchlosť [$m.min^{-1}$]	11,5	8,4	6,3	4,7	10,72
Ra [μm]	1,617	1,542	0,221	0,284	1,88
Rz5 [μm]	7,27	7,877	1,288	1,494	8,956
Cena za 1 ks [Kč]	0,72	0,99	1,1	1,42	0,56
Cena za 1000 ks [Kč]	7 200	9 900	11 000	14 200	5 600

Z tabuľky je zrejmé, že napriek vyššej hodinovej sadzbe rezania dusíkom v porovnaní s kyslíkom je cena jednej vzorky nižšia. Je to dané tým, že použitá rezná rýchlosť pri rezaní dusíkom je takmer dvojnásobná oproti použitej reznej rýchlosti pri rezaní kyslíkom.

5 ZÁVERY

Predmetom diplomovej práce bolo porovnanie tavného a oxidačného spôsobu laserového delenia plechu pre firmu ACO Industries k. s., kde bola vykonaná aj experimentálna časť. Vzorky boli rezané kyslíkom a dusíkom z plechu hrúbky 2 a 3 mm na stroji Trulaser 3030. Po dohovore s technologom firmy ACO, bola práca rozšírená o dáta vzoriek rezaných stlačeným vzduchom pre porovnanie kvality rezu s ostatnými dvoma procesnými plynmi.

Návrh optimalizácie rezných parametrov bol vytvorený Taguchiho metódou. Podľa nej sa vytvorili kombinácie parametrov, ktoré najviac ovplyvňujú proces laserového delenia t. j. rezná rýchlosť, výkon, tlak rezného plynu a poloha ohniska. Po vyrezaní sa kontrolovalo vypadnutie jednotlivých vzoriek z tabúľ plechu a následne bolo prevedené meranie drsnosti vzoriek na Ústave prístrojovej techniky AV ČR. Na základe zmeraných hodnôt parametru Ra a Rz5 boli vzorky graficky zaradené do tried presnosti, ktoré určuje norma ISO 9013. Vzorky rezané dusíkom a kyslíkom boli zaradené do prvej triedy presnosti. V prípade rezania stlačeným vzduchom bolo do prvej triedy zaradených len 10 z celkovo 16 vzoriek. Následne boli vytvorené mikroskopické snímky vybraných zástupcov z každej sady vzoriek. Po experimentálnej časti nasledovalo technicko - ekonomické zhodnotenie. Na základe tejto práce možno konštatovať nasledujúce možnosti optimalizácie rezných parametrov:

- pri vzorkách rezaných dusíkom, hrúbky 2 mm má z hľadiska produktivity a kvality rezu najlepšie vlastnosti vzorka č. 1. Odpovedá továrenskému nastaveniu laseru a vykazuje stabilný proces s nízkym rozptylom hodnôt drsnosti.
- pri vzorkách rezaných dusíkom, hrúbky 3 mm je možné oproti štandardnému nastaveniu zvýšiť rýchlosť o 4,76% (zvýšenie o $0,5 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$) za súčasného zníženia drsnosti povrchu o 3,6% (zlepšenie drsnosti o $0,33 \text{ } \mu\text{m}$). Tomuto nastaveniu odpovedá vzorka č. 10.
- pri vzorkách rezaných kyslíkom, hrúbky 2 mm bolo takisto dosiahnuté urýchlenia procesu, u vzorky č. 9, zvýšením reznej rýchlosti z pôvodnej hodnoty $5,5 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ na hodnotu $6,3 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, čo v percentách predstavuje zlepšenie až o 12,7%. Drsnosť sa pri tomto nastavení zvýši len minimálne.
- pri vzorkách rezaných kyslíkom, hrúbky 3 mm je možné dosiahnuť hladší rez zvýšením reznej rýchlosti o 8,5% oproti pôvodnému nastaveniu.

Z hľadiska požiadavok technickej praxe je možné pre zvýšenie produktivity využiť vyššie uvedené optimalizácie vo výrobnom procese.

Výsledky meraní a technicko-ekonomické zhodnotenie ďalej ukázali, že tavný spôsob rezania laserom je výhodnejší, a to najmä kvalitou reznej hrany. Oproti oxidačnému spôsobu rezania dosahuje síce vyššie hodnoty drsnosti približne o 1 – $1,2 \text{ } \mu\text{m}$, no nepodlieha tvorbe oxidickej vrstvy a teda rezná hrana je bez okují, ktoré často obmedzujú rozsah použitia. Tavný spôsob rezania sa robí reznými rýchlosťami, ktoré sú až dvojnásobne vyššie oproti oxidačnému spôsobu, čo vedie k zníženiu časovej a finančnej náročnosti procesu, a to napriek jeho vyššej hodinovej sadzbe.

V prípade delenia materiálu stlačeným vzduchom je nutné uvažovať s obmedzením v rozsahu hrúbok delených materiálov, ako aj so vznikom oxidickej vrstvy vplyvom vzdušného kyslíku. Kvalita rezu v porovnaní s tavným a oxidačným spôsobom nie je dostačujúca.

ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV

1. NEDIC, Bogdan, Milan ERIC a Marijana ALEKSIJEVIC. CALCULATION OF LASER CUTTING COSTS. *International Journal for Quality Research*[online]. 2016, 2016-09-30, (3), 487-494 [cit. 2018-02-12]. DOI: 10.18421/IJQR10.03-03. ISSN 1800-6450. Dostupné z: <http://paper.researchbib.com/view/paper/93295>
2. SAMI YILBAS, Bekir. *The Laser Cutting Process: Analysis and Applications*. Elsevier, 2018. ISBN 978-0-12-812982-1.
3. LAPŠANSKÁ, Hana. *Laserové technologie v praxi* [online]. 13. decembra 2010 [cit. 2018-03-8]. Dostupné z: <https://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/granty/laser.pdf>
4. OWN, Lindsey. *Introduction to Design for the Laser Cutter* [online]. 13 október, 2016 [cit. 2018-03-11]. Dostupné z: <http://www.gettingsmart.com/2016/10/introduction-design-laser-cutter/>
5. *Laser cutting* [online]. In: . [cit. 2018-05-12]. Dostupné z: <https://www.acsys.de/en/laser-cutting.html>
6. *LT-FREE five-axis laser cutting system for 3D parts* [online]. In: . 1 jún 2016 [cit. 2018-03-11]. Dostupné z: <http://www.machiningnews.com/2016/06/lt-free-five-axis-laser-cutting-system-for-3d-parts/>
7. BENKO, Bernard, Peter FODREK, Miroslav KOSEČEK a Róbert BIELAK. *Laserové technológie*. Bratislava: STU v Bratislave, 2000. ISBN 80-227-1425-9.
8. *ACO Příbyslav* [online]. [cit. 2018-03-01]. Dostupné z: <http://www.aco-industries.cz/home/>
9. MRŇA, Libor. *Konzultácia*. Brno, 2018.
10. *Konstrukce: Oxy-acetylenové rezanie – najrozšírenejšia metóda tepelného rezania nelegovaných ocelí* [online]. 2009 [cit. 2018-03-03]. ISSN 1803-8433. Dostupné z: <http://www.konstrukce.cz/clanek/oxy-acetylenove-rezanie-najrozsirenejšia-metoda-tepelneho-rezania-nelegovanych-oceli/>
11. ŠOUKAL, Hynek. *Optimalizace výroby součástky z konstrukční oceli tl. 20 mm technologií laserového dělení*. VUT v Brne, 2017. Diplomová práce. Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Doc. RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.
12. DOČEKAL, Miroslav. *Posouzení vlastností rezné hrany ocelového plechu při tavném a oxidacní rezání pevnolátkovým laserem*. VUT v Brne, 2015. Diplomová práce. Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Doc. RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.
13. *Rezanie acetylenom. DDO Delenie ocele s.r.o.* [online]. [cit. 2018-03-07]. Dostupné z: <http://www.ddo.sk/sluzby/rezanie-acetylenom>

14. TECHNO-ECONOMICAL COMPARISON OF CUTTING MATERIAL BY LASER, PLASMA AND OXYGEN. *Ekonomika usporedba rezanja materijala pomoću lasera, plazme i kisika* [online]. 2012, , 813-817 [cit. 2018-05-13]. ISSN 1330-3651. Dostupné z: <https://pdfs.semanticscholar.org/ca36/074ef685ed17cb72fb15c66422240d59675a.pdf>
15. Rezanie plazmou / Technologíe. *Microstep* [online]. [cit. 2018-05-13]. Dostupné z: <https://www.microstep.sk/technologie/rezanie-plazmou/>
16. ANALÝZA VÝBERU VHODNÝCH SPÔSOBOV ENERGOLÚČOVÝCH SPÔSOBOV DELENIA KOVOVÝCH MATERIÁLOV. *Strojárstvo/Strojírenství* [online]. [cit. 2018-03-14]. Dostupné z: <http://www.engineering.sk/strojarstvo-extra/2953-analyza-vyberu-vhodnych-sposobov-energolucovych-sposobov-delenia-kovovych-materialov>
17. *Dělení a svařování svazkem plazmatu* [online]. Ústav strojírenské technologie [cit. 2018-02-12]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/hsv_specialni_metody_svarovani_deleni_a_svarovani_plasmou_2013_mrna.pdf 18.
18. *Anzaset: Plasma cutting* [online]. [cit. 2018-05-13]. Dostupné z: <http://anzaset.com/plasma-cutting/>
19. *Hypertherm: Shaping possibility* [online]. [cit. 2018-05-13]. Dostupné z: <https://www.hypertherm.com/learn/cutting-education/plasma-technology/>
20. *Plasma advantages and disadvantages. Plazmacz* [online]. [cit. 2018-05-13]. Dostupné z: <http://www.plazmacz.cz/en/plasma-advantages-and-disadvantages/>
21. *Water Jet Cutting Technology* [online]. [cit. 2018-03-10]. Dostupné z: <https://www.slideshare.net/ankitpalgenius/water-jet-cutting-technology-9143135>
22. *Waterjet Cutting Technology* [online]. [cit. 2018-03-10]. Dostupné z: <https://www.kmt-waterjet.com/waterjet-technology.aspx>
23. *Waterjet Cutting Technology. KMT Waterjet* [online]. [cit. 2018-03-10]. Dostupné z: <http://www.engineering.sk/clanky2/stroje-a-technologie/1296-obrabanie-vodnym-luom-a-jeho-aplikacie>
24. Obrábanie vodným lúčom a jeho aplikácie. *Strojárstvo/Strojírenství* [online]. [cit. 2018-03-11]. Dostupné z: <http://www.engineering.sk/clanky2/stroje-a-technologie/1296-obrabanie-vodnym-luom-a-jeho-aplikacie>
25. KUDLÁČ, Lukáš. *Optimalizace procesu vysekávání na stroji Trupunch 1000*. VUT v Brně, 2015. Bakalárska práca. Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. EVA PETERKOVÁ, Ph.D.
26. *KOVOOBRÁBĚNÍ-JRH* [online]. [cit. 2018-05-13]. Dostupné z: <https://www.kovovyroba-jrh.cz/derovani-vysekovani-ohranovani-plechu/>

27. *Vysekávání plechů. Promat* [online]. [cit. 2018-03-11]. Dostupné z: <https://www.promatcz.cz/cz/cnc-vyroba/vysekavani-plechu/>
28. *Laserové rezanie. Messercutting* [online]. [cit. 2018-03-13]. Dostupné z: <http://www.messercutting.sk/sk/procesy/laserove-rezanie/>
29. *LASCAM: Základné rozdelenie laserového rezania* [online]. [cit. 2018-03-18]. Dostupné z: <http://www.lascam.cz/sk/zakladne-rozdelenie-laseroveho-rezania/>
30. *Strojárstvo/Strojírenství: VÝHODY A NEDOSTATKY TECHNOLOGIÍ DELENIA KYSLÍKOM, PLAZMOU A LASEROM V PRAXI* [online]. [cit. 2018-03-20]. Dostupné z: <http://www.engineering.sk/clanky2/stroje-a-technologie/785-vyhody-a-nedostatky-technologie-delenia-kyslikom-plazmou-a-laserom-v-praxi>
31. *Základy laserové techniky. Ústav strojírenské technologie* [online]. [cit. 2018-03-05]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/opory_soubory/hsv__specialni_metody_svarovani__zaklady_laserove_techiky_2013__mrna.pdf
32. *AKELA: Laser corporation* [online]. [cit. 2018-05-13]. Dostupné z: <http://www.akelalaser.com/markets/industrial/>
33. *St. Anns Laser Cutting* [online]. [cit. 2018-03-22]. Dostupné z: <http://www.lasercuttingsheetmetal.co.uk/what-is-air-cutting.htm>
34. *All You Wanted to Know About Air-assisted Laser Cutting. Medium* [online]. [cit. 2018-03-20]. Dostupné z: <https://medium.com/@altpartsinc/all-you-wanted-to-know-about-air-assisted-laser-cutting-f3a5379a7b50>
35. *Laserové řezání: volba a vlastnosti asistenčních plynů* [online]. [cit. 2018-03-10]. Dostupné z: https://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv-technik/laserove-rezani-volba-a-vlastnosti-asistencnich-plynu_28272.html
36. KRAMOLIŠ, Lukáš. *Laserové řezání s podporou vzduchu*. VUT v Brně, 2010. Diplomová práce. Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce RNDr. LIBOR MRŇA, Ph.D.
37. CARISTAN, Charles L. *Laser Cutting Guide for Manufacturing*. Dearborn, Michigan: One SME Drive, 2004. ISBN 0-87263-686-0.
38. TRUMPF. *Workbook: Lasers and laser cutting*
39. TRUMPF. *Laser Machining: Technical Information*.
40. *Řezání laserem: Ústav strojírenské technologie* [online]. [cit. 2018-04-01]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/hsv_specialni_metody_svarovani_rezani_laserem_2013_mrna.pdf
41. *MM Spektrum* [online]. [cit. 2018-03-24]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/slab-innoslab-kotoucovy-nebo-vlaknovy-laser.html>

42. *CO2 Lasers: The Industrial Workhorse* [online]. [cit. 2018-03-22]. Dostupné z: https://www.photonics.com/a25155/COSUB2SUB_Lasers_The_Industrial_Workhorse
43. *Nd:YAG Lasers: Standing the Test of Time* [online]. [cit. 2018-04-05]. Dostupné z: <https://www.photonics.com/EDU/Handbook.aspx?AID=25042>
44. *Photonics Encyclopedia: YAG Lasers* [online]. [cit. 2018-04-04]. Dostupné z: https://www.rp-photonics.com/yag_lasers.html?s=ak
45. *Princip pevnolátkových Nd:YAG laserů* [online]. [cit. 2018-04-08]. Dostupné z: <http://www.lt.cz/e-learning/laser/princip-pevnolatkovych-nd-yag-laseru-1064-nm-infra-red>
46. Trumpf: TruDisk - Diskový laser [online]. [cit. 2018-04-02]. Dostupné z: https://www.trumpf.com/cs_CZ/produkty/laser/diskovy-laser/trudisk/
47. *Photonics Media: Fiber vs. Disk: Which Laser Will Make the Cut?* [online]. [cit. 2018-04-04]. Dostupné z: https://www.photonics.com/a47616/Fiber_vs_Disk_Which_Laser_Will_Make_the_Cut
48. *Fiber Lasers: New Types and Features Expand Applications* [online]. [cit. 2018-03-18]. Dostupné z: <https://www.photonics.com/EDU/Handbook.aspx?Tag=Lasers&AID=25158>
49. *How Fibre Lasers Work* [online]. [cit. 2018-04-13]. Dostupné z: <https://www.orc.soton.ac.uk/how-fibre-lasers-work>
50. *Laser Cutting with Oxygen* [online]. [cit. 2018-05-13]. Dostupné z: http://www.linde-gas.com/en/processes/cutting_joining_and_heating/cutting/laser_cutting/laser_cutting_with_oxygen/index.html
51. LASCAM: *Rozdělení laserů* [online]. [cit. 2018-04-13]. Dostupné z: <http://www.lascam.cz/rozdeleni-laseru/>
52. *LT - Nastavení parametrů laseru* [online]. [cit. 2018-04-13]. Dostupné z: <http://www.lt.cz/e-learning/laser/nastaveni-parametru-laseru>
53. *LASER CUTTING PARAMETERS* [online]. [cit. 2018-05-13]. Dostupné z: <https://cdn.thomasnet.com/ccp/30498769/185895.pdf>
54. ČSN EN ISO 9013: *Tepelné dělení - klasifikace tepelných řezů – Geometrické požadavky na výrobky a úchyly jakosti řezu*. Praha: Český normalizační institut, 2003.
55. TICHÁ, Šárka. *Strojírenská metrologie: Část I*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2004. ISBN 80-248-0671-1.
56. *Introduction to Taguchi method* [online]. [cit. 2018-05-13]. Dostupné z: https://www.ee.iitb.ac.in/~apte/CV_PRA_TAGUCHI_INTRO.htm
57. BALISNOMO, Ramon. *Introduction to Taguchi Methods* [online]. 2008 [cit. 2018-04-17]. Dostupné z: <https://www.slideshare.net/rbalisnomo/Introduction-To-Taguchi-Method-05Sep08>

58. NOVOHRADSKÝ, Jan. *Porovnání vybraných statistických metod pro hodnocení jakosti*. Plzeň, 2012. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce Doc. Ing. Jana KLEINOVÁ, CSc.
59. Application Of Taguchi Method For Optimization Of Process Parameters In Improving The Surface Roughness Of Lathe Facing Operation. *International Refereed Journal of Engineering and Science*. IRJES, 2012, 1(3), 13-19. ISSN 2319-183X.
60. MAHR: *Marsurf M 300 Přenosný drsnoměr* [online]. [cit. 2018-04-01]. Dostupné z: <https://www.mahr.com/cs/Produkty-a-sluzby/Vyrobní-měřicí-technika/Produkty/MarSurf---Mobilní-zařízení-na-měření-drsnosti/MarSurf-M-300---Přenosný-drsnoměr/>
61. TRUMPF: *TruLaser 3030* [online]. [cit. 2018-05-05]. Dostupné z: https://www.trumpf.com/cs_CZ/produkty/stroje-systemy/2d-laserove-rezaci-stroje/trulaser-30303040/
62. *Citace pro: Generátor citací* [online]. 2016 [cit. 2018-01-13]. Dostupné z: <https://citace.lib.vutbr.cz>

ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK

Skratka/symbol	Jednotka	Popis
CW	[-]	pulzný režim laseru
LED	[-]	luminiscenčná dióda
ln	[mm]	vyhodnocovaná dĺžka merania drsnosti
lr	[mm]	základná dĺžka merania drsnosti
n	[-]	faktorový experiment
Rz5	[μ m]	priemerná výška 5 základných výšok profilu
Rz	[μ m]	maximum výšky základného profilu
TEM00	[-]	módová štruktúra lúča laseru
TEM01	[-]	módová štruktúra lúča laseru
u	[mm]	úchylka kolmosti rezu v rovine podľa normy
YAG	[-]	yttriový hlinitý granát ($Y_3Al_5O_{12}$)
λ	[m]	vlnová dĺžka lúča
Δa	[mm]	zmenšenie vyhodnocované hrúbky rezu

Zoznam obrázkov

1	Príklady laserového rezania. [4], [5], [6]	11
2	Produkty firmy ACO Industries k.s. [8]	12
3	Vzorové súčiastky	12
4	Rezanie kyslíkom [13]	13
5	Príklad rezania plazmou [19]	14
6	Princíp rezania vodným lúčom [24]	15
7	Rezanie vodným lúčom [23]	15
8	Príklady vysekávaných dielcov [27]	16
9	Vysekávací stroj [27]	17
10	Princíp laserového rezania [40]	17
11	Rezanie laserom [28]	18
12	Postup výroby stlačeného vzduchu [35]	18
13	Zastúpenie laserových technológií v priemysle [7]	19
14	Časti laserového procesu [39]	19
15	Uhol divergencie lúča [11]	20
16	Mód TEM_{00} [31]	21
17	Nesprávna a správna symetria lúča [31]	21
18	Absorpcia žiarenia niektorých materiálov [32]	22
19	Konštrukcia CO_2 laseru [42]	23
20	Konštrukcia SLAB laseru [42]	24
21	Konštrukcia Nd:YAG tyčkového laseru [40]	24
22	Konštrukcia diskového Nd:YAG laseru [40]	25
23	Schéma vláknového laseru [40]	25
24	Princíp vláknového laseru [49]	26
25	Poloha ohniska pri oxidačnom rezaní [40]	26
26	Poloha ohniska pri tavnom rezaní [40]	27
27	Vplyv rezného výkonu na kvalitu reznej hrany [40]	29
28	Vplyv reznej rýchlosti na kvalitu reznej hrany [40]	29
29	Vplyv režimu na kvalitu prevedenia rezu [53]	29
30	Porovnanie rezných hrán pri použití kyslíku, resp. dusíku [53]	30
31	Umiestnenie ohniska laserového lúča [53]	30
32	Vplyv polohy ohniska na kvalitu rezu [40]	31
33	Funkcia trysky pri laserovom delení [53]	31
34	Odchýlka kolmosti [54]	32
35	Graf závislosti hrúbky materiálu a odchýlky kolmosti, resp. uhlu [54]	33
36	Najväčšia výška profilu R_z [55]	33
37	Priemerná aritmetická odchýlka profilu R_a [55]	33
38	Závislosť hrúbky materiálu na parametre R_{z5} [54]	34

39	Ilustračný obrázok stroja [61]	37
40	Parametre vzoriek	38
41	Vyrezané vzorky na tabuli plechu	42
42	Meracia jednotka v prevádzke	42
43	Smer otáčania vzorky	43
44	Zaradenie vzoriek do triedy presnosti; N ₂ ; t = 2 mm	45
45	Graf drsnosti Ra vzoriek; N ₂ ; t = 2 mm	45
46	Zaradenie vzoriek do triedy presnosti; N ₂ ; t = 3 mm	47
47	Hodnoty drsnosti Ra; dusík; 3 mm	47
48	Zaradenie vzoriek do triedy presnosti; O ₂ ; 2 mm	49
49	Hodnoty drsnosti; O ₂ ; 2 mm	49
50	Zaradenie vzoriek do triedy presnosti; O ₂ ; 3 mm	51
51	Hodnoty drsnosti; O ₂ ; 3 mm	51
52	Zaradenie vzoriek do triedy presnosti; vzduch; 2 mm	53
53	Hodnoty drsnosti; vzduch; 2 mm	53
54	Štruktúra reznej hrany; dusík; 2 mm	54
55	Štruktúra reznej hrany; dusík; 3 mm	54
56	Štruktúra reznej hrany; kyslík; 2 mm	55
57	Štruktúra reznej hrany; kyslík; 3 mm	55
58	Štruktúra reznej hrany; stlačený vzduch; 2 mm	56

Zoznam tabuliek

1.1	Vlastnosti rezu v závislosti na druhu plazmy [17]	14
2.1	Rozdelenie parametrov [39]	28
2.2	Tolerančné pole odchýlky kolmosti [54]	33
2.3	Tolerančné pole parametru Rz_5 [54]	34
2.4	Počet potrebných experimentov pri plne faktoriálnej metóde [58]	34
2.5	Voľba parametrov a úrovní pre Taguchi metódu [59]	35
2.6	Voľba ortogonálnych polí	36
3.1	Technické údaje laseru [61]	37
3.2	Chemické zloženie materiálu DC01	38
3.3	Mechanické vlastnosti materiálu DC01	38
3.4	Rozloženie parametrov a ich úrovní podľa Taguchi metódy	39
3.5	Zvolené hodnoty rezných parametrov pre $t = 2$ mm (N_2) veľká kontúra	40
3.6	N_2 ; veľká kontúra; $t = 2$ mm	40
3.7	Zvolené hodnoty rezných parametrov pre $t = 3$ mm (N_2) veľká kontúra	41
3.8	Zvolené hodnoty rezných parametrov pre $t = 2$ mm (O_2) veľká kontúra	41
3.9	Zvolené hodnoty rezných parametrov pre $t = 3$ mm (O_2) veľká kontúra	41
3.10	Zvolené hodnoty rezných parametrov pre $t = 2$ mm (stlačený vzduch) veľká kontúra	42
3.11	Technické údaje drsnomeru MarSurf M300 [60]	43
3.12	Dusík N_2 ; $t = 2$ mm	44
3.13	Dusík N_2 ; $t = 3$ mm	46
3.14	Kyslík O_2 ; $t = 2$ mm	48
3.15	Kyslík O_2 ; $t = 3$ mm	50
3.16	Stlačený vzduch; $t = 2$ mm	52
4.1	Technicko – ekonomické zhodnotenie	57

ZOZNAM PRÍLOH

- Príloha 1** Absorpcia žiarenia niektorých materiálov
- Príloha 2** Atest materiálu DC 01
- Príloha 3** Rezné parametre doporučené firmou Trumpf
- Príloha 4** Rozloženie parametrov podľa Taguchi metódy
- Príloha 5** Snímky vzniknutých väd rezu

Príloha 1

Vplyv vlnovej dĺžky žiarenia na veľkosť absorpcie lešteného povrchu

Druh materiálu leštený povrch	Absorpcia [%] CO ₂ laser ($\lambda = 10,6 \mu\text{m}$)	Absorpcia [%] CO ₂ laser ($\lambda = 5,3 - 5,6 \mu\text{m}$)	Absorpcia [%] YAG laser ($\lambda = 1,06 \mu\text{m}$)
Oceľ 35NCD16	5,15 – 5,25	8,55 – 8,56	29,75 – 30
Oceľ 35CD4	4,45 – 4,55	7,5 – 7,6	28,6 – 29,4
Titán	7,4 – 7,6	12,9 – 13,2	34,8 – 35,4

Vplyv stavu povrchu na koeficient absorpcie ocele 35NCD16

Stav povrchu	Priemerná drsnosť povrchu Ra [μm]	Absorpcia [%] CO ₂ laser ($\lambda = 10,6 \mu\text{m}$)	Absorpcia [%] YAG laser ($\lambda = 1,06 \mu\text{m}$)
Leštený	0,02	5,15 – 5,25	29,75 – 30
Brúsený	0,21	7,45 – 7,55	38,9 – 40,1
Brúsený	0,28	7,70 – 7,80	40,2 – 41,4
Valcovaný	0,87	5,95 – 6,05	33,80 – 34,20
Pieskovaný	1,65	33,85 – 34,30	68,20 – 68,40

METAL TRADE COMAX, a.s.

Velvary 420

INSPECTION CERTIFICATE EN 10204-3.1

273 24 Velvary

INSPEKČNÍ CERTIFIKÁT

ČSN EN 10204-3.1

Customer Zákazník	ACO Industries, k.s.	Date Datum vystavení	28.3.2018
Contract Prodejní objednávka č.	KS-PD-1804543	Delivery note Dodací list č.	DL-KO-1802257
Customer order no. Číslo externího dokladu	1180202990/1170500157	Weight netto [kg] Hmotnost netto [kg]	4 270
Base material Zákl. materiál / stav	DC01	Weight brutto [kg] Hmotnost brutto [kg]	
Dimension Rozměry v mm	2,00x1500x3020	Weight [kg/ m2] Hmotnost [kg/ m2]	
Chemical pretreatment chemická předúprava			

Výsledky mechanických zkoušek

Číslo tavby	Číslo šarže	Mez kluzu Re (Rp 02)	Pevnost v tahu Rm	Tažnost A			
		MPa	MPa	%			
278553	180130K511415	198	313	40,1			
278553	180130K511515						
278553	180130K511615						
278553	180130K511715						
278553	180130K511815						

Chemické složení

Číslo tavby	Číslo šarže	C	Mn	P	S	Si							
278553	180130K511415	0,031	0,175	0,006	0,009	0,005							
278553	180130K511515												
278553	180130K511615												
278553	180130K511715												
278553	180130K511815												

METAL TRADE COMAX, a.s.

273 24 Velvary 420

DIČ: CZ49684442

(40)

Poznámka: Opis hodnot z hutního atestu dodavatele.

Note: Transcription of the values of supplier's original certificate.

Allgemeine Parameter

P4 P2 P1 P3

2) Weiterverarbeitung muss zurechtfinden und nicht groß sein. Als Extraradius R2 programmieren. Bei zu dichter Teilabkantung kann das Dreieck überhitzten und die Schnittqualität sehr schlecht werden!

Tabellensammlung 3

TruDisk 3001
Baustahl
Druckluftschneiden

Schneiden große Kontur

Allgemeine Parameter												
ST01M ST01M ST01M ST01M ST01M DPA150 DPA150 DPA150 DPA150 DPA150 30,2 30,2 30,2 30,2 30,2												
Minutendreh	mm	1	1,3	1,5	2	2,5	3					
Leistungswerte	mm	200	200	200	200	200	200					
Drehendresser	mm	EA17	EA20	EA20	EA21	EA21	EA20					
Schneiden der Kontur												
Erstschneid-Funktion	mm	-0,8	-0,8	-0,8	-1,5	-2	1					
Stückschneidresser	mm	15	20	20	20	25	15					
Gabe	mm	AIR	AIR	AIR	AIR	AIR	AIR					
Schneidgeschwindigkeit	mm	0,17	0,2	0,2	0,2	0,2	0,25					
Konturbehandlung		1(2)	1(2)	1(2)	1(2)	1(2)						
Leistung	W	3000	3000	3000	3000	3000	3000					
Tiefenverz	mm	20000	20000	20000	20000	20000	20000					
Schneidgeschwindigkeit	mm/min	25,00	19,40	17,00	12,50	8,60	5,00					
Drehendresser	mm	0,8	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7					
Gabe	mm	5,0	5,0	5,0	6,0	5,0	6,0					
Anfahren der Kontur												
Leistung	W	3000	3000	3000	3000	3000	3000					
Tiefenverz	mm	20000	20000	20000	20000	20000	20000					
Schneidgeschwindigkeit	mm/min	25	19,4	17	12,5	8	5					
Drehendresser	mm	0,8	0,8	0,8	0,7	0,7	0,7					
Gabe	mm	5,0	5,0	5,0	6,0	5,0	6,0					
Analogsteuerung												
Geschwindigkeit	mm/min	20	15	15	10	7	4					
Übergeordnete Geschwindigkeit	mm/min	0,80	0,60	0,60	0,50	0,35	0,30					
Leistungsleistung												
Übergeordnete Leistung	W	2500	2500	2500	2500	2500	2800					
Übergeordnete Leistung	W	1000	1000	1000	1000	1500	800					
Frequenzsteuerung												
Übergeordnete Leistung	Hz	1800	1200	1200	1200	1200	1000					
Übergeordnete Leistung	Hz	800	800	800	500	300	500					

1) In der Tabelle sind die Werte in der Größe aufgeführt.
2) In der Tabelle sind die Werte in der Größe aufgeführt.

Príloha 4

Tab. N₂; veľká kontúra; t = 3mm

Číslo vzorky	Rezná rýchlosť P1 [m.min]	Výkon laseru P2 [W]	Tlak plynu P3 [bar]	Poloha ohniska P4 [mm]
1	7,6	3000	16	-2
2	7,6	3300	16,5	-1,5
3	7,6	3600	17	-1
4	7,6	2700	15,5	-2,5
5	8	3000	16,5	-1
6	8	3300	16	-2,5
7	8	3600	15,5	-2
8	8	2700	17	-1,5
9	8,4	3000	17	-2,5
10	8,4	3300	15,5	-1
11	8,4	3600	16	-1,5
12	8,4	2700	16,5	-2
13	7,2	3000	15,5	-1,5
14	7,2	3300	17	-2
15	7,2	3600	16,5	-2,5
16	7,2	2700	16	-1

Tab. O₂; velká kontúra; t = 2mm

Číslo vzorky	Rezná rychlost P1 [m.min]	Výkon laseru P2 [W]	Tlak plynu P3 [bar]	Poloha ohniska P4 [mm]
1	5,5	1000	2,5	+0,5
2	5,5	1300	3	0
3	5,5	1600	3,5	-0,5
4	5,5	900	2	1
5	5,9	1000	3	-0,5
6	5,9	1300	2,5	1
7	5,9	1600	2	+0,5
8	5,9	900	3,5	0
9	6,3	1000	3,5	1
10	6,3	1300	2	-0,5
11	6,3	1600	2,5	0
12	6,3	900	3	+0,5
13	5,1	1000	2	0
14	5,1	1300	3,5	+0,5
15	5,1	1600	3	1
16	5,1	900	2,5	-0,5

Tab. O₂; veľká kontúra; t = 3mm

Číslo vzorky	Rezná rýchlosť P1 [m.min]	Výkon laseru P2 [W]	Tlak plynu P3 [bar]	Poloha ohniska P4 [mm]
1	4,3	1000	4,5	-0,5
2	4,3	1300	5	0
3	4,3	1600	5,5	+0,5
4	4,3	900	4	1
5	4,7	1000	5	+0,5
6	4,7	1300	4,5	1
7	4,7	1600	4	-0,5
8	4,7	900	5,5	0
9	5,1	1000	5,5	1
10	5,1	1300	4	+0,5
11	5,1	1600	4,5	0
12	5,1	900	5	-0,5
13	3,9	1000	4	0
14	3,9	1300	5,5	-0,5
15	3,9	1600	5	1
16	3,9	900	4,5	+0,5
17	4,3	1000	4	1

Tab. stlačený vzduch; veľká kontúra; t = 2mm

Číslo vzorky	Rezná rýchlosť P1 [m.min]	Výkon laseru P2 [W]	Tlak plynu P3 [bar]	Poloha ohniska P4 [mm]
1	12,5	3000	5	-1
2	12,5	3300	5,5	-1,5
3	12,5	3600	6	-2
4	12,5	2700	4,5	-2,5
5	12,9	3000	5,5	-2
6	12,9	3300	5	-2,5
7	12,9	3600	4,5	-1
8	12,9	2700	6	-1,5
9	13,4	3000	6	-2,5
10	13,4	3300	4,5	-2
11	13,4	3600	5	-1,5
12	13,4	2700	5,5	-1
13	12,1	3000	4,5	-1,5
14	12,1	3300	6	-1
15	12,1	3600	5,5	-2,5
16	12,1	2700	5	-2
17	14	3000	5	-2,5

Príloha 5: Vady vzoriek

